MAYO 2009

INVESTIGACION Y CIENCIA



Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

NEUROCIENCIA
Beneficios del ejercicio mental

GEOLOGIA
¿Cómo se forma el lecho oceánico?

MEDICINA
Nuevos fármacos contra la tuberculosis

SEGURIDAD
Control de las pruebas nucleares

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

MUNDO CUANTICO Y RELATIVIDAD

¿Son realmente compatibles?



SUMARIO

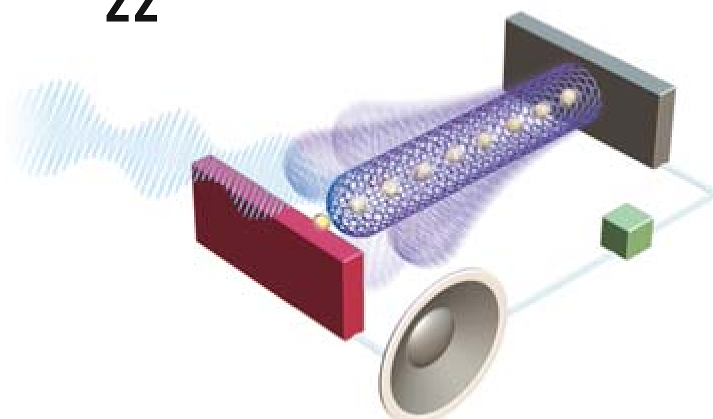
Mayo de 2009/ Número 392



La abundancia local es uno de los parámetros que determinan si una especie es rara o común.

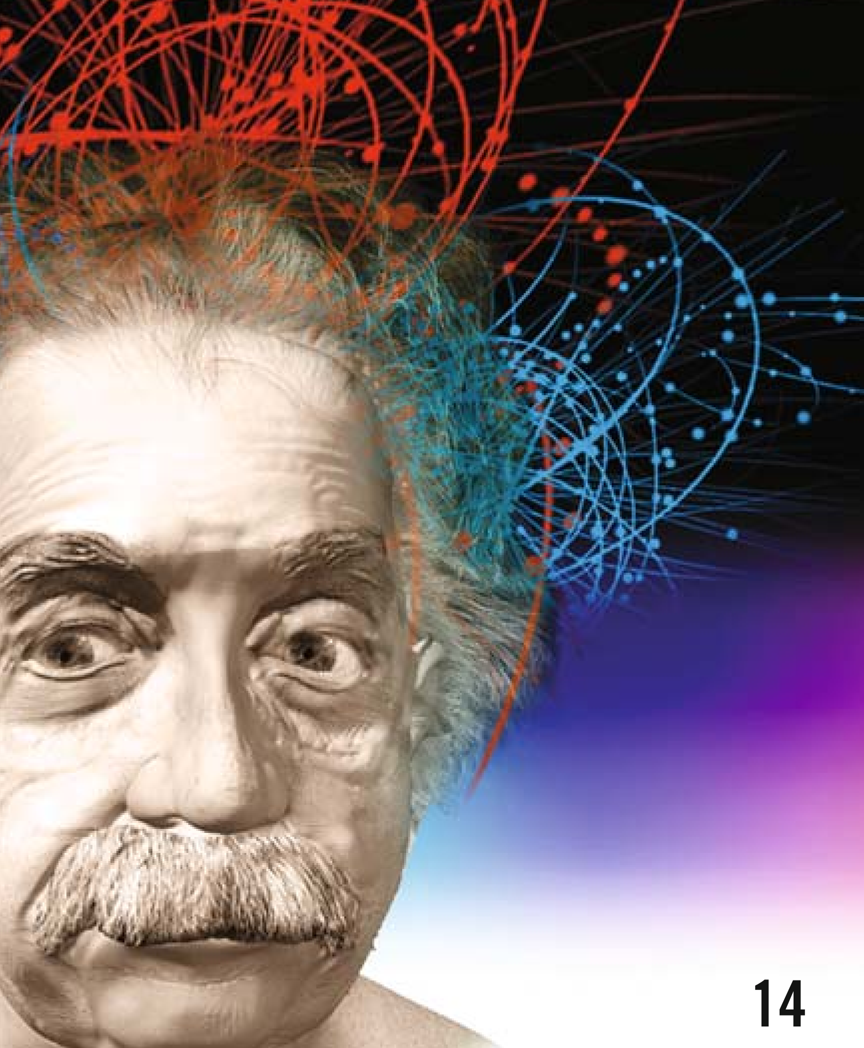


La neurogénesis podría ayudar a frenar el deterioro cognitivo.

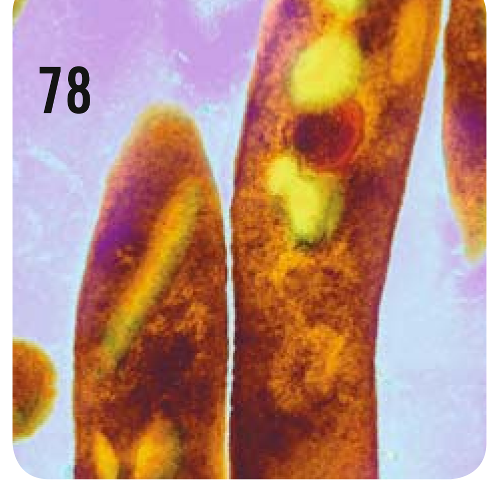


Una nanoestructura de carbono sintoniza, desmodula y reproduce emisiones de radio.

ARTICULOS



¿Choca el entrelazamiento cuántico con la relatividad de la simultaneidad?



Robert Koch identificó en 1882 *Mycobacterium tuberculosis*, la bacteria tuberculosa.



Una prueba nuclear no puede pasar desapercibida.

SECCIONES

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

DISTRIBUCION
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

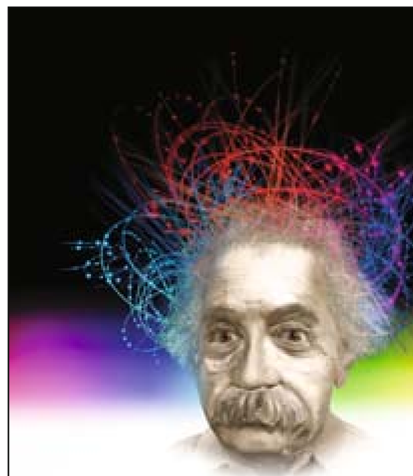
para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Ramón Pascual: *El principio de localidad*; Juan Manuel González Mañas: *Salvar las neuronas nuevas*; Sònia Ambròs Albesa: *Origen del fondo submarino*; Luis Bou: *Energías de fuentes renovables* y *Puesta al día*; Bruno Moreno: *Apuntes*; J. Vilardell: *Vigilancia de ensayos nucleares, Hace... Apuntes* e *Ideas aplicadas*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*; Salvador Moyà: *Taller y laboratorio*



Portada: Jean-Francois Podevin

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

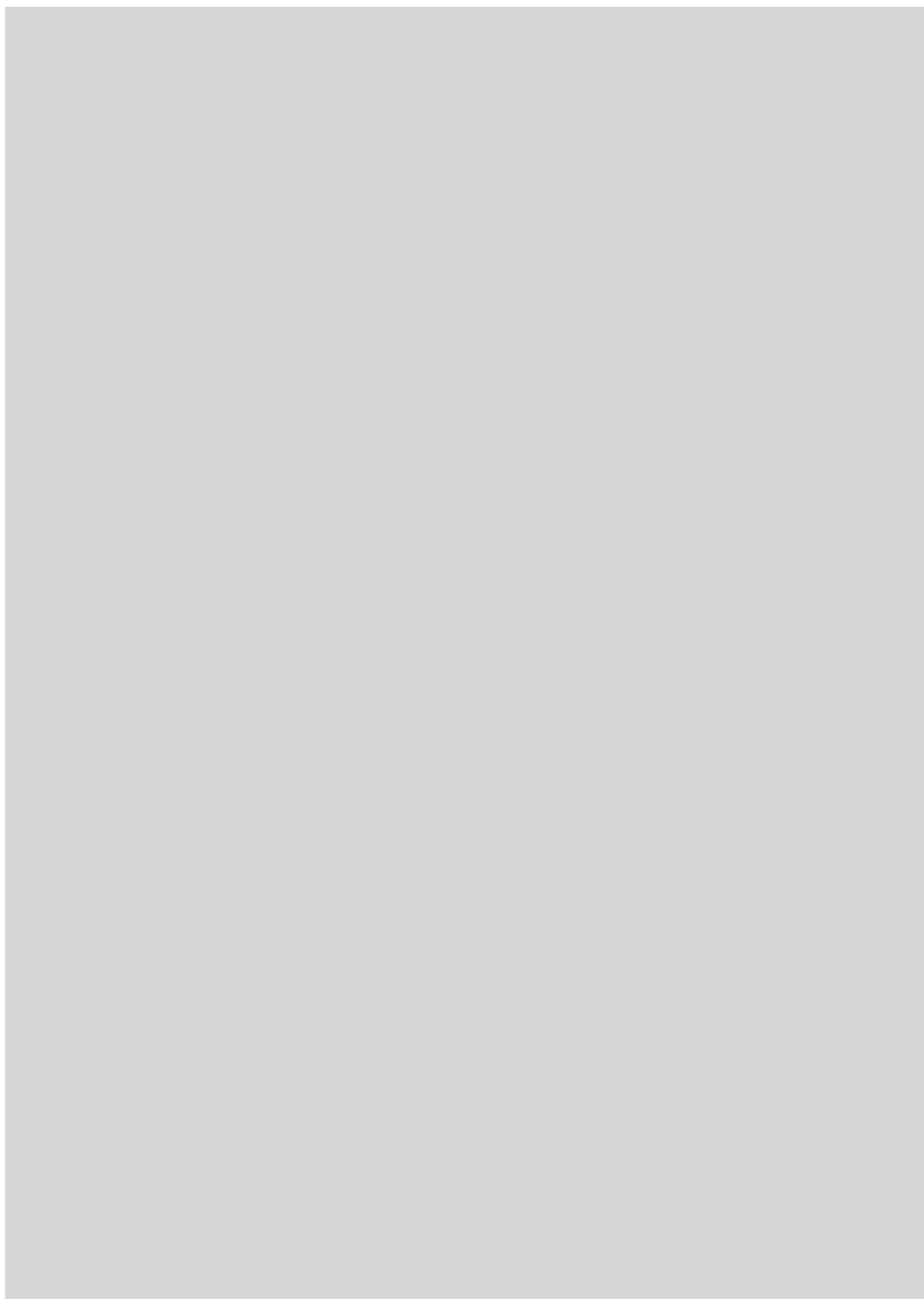
El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



Recopilación de Daniel C. Schlenoff

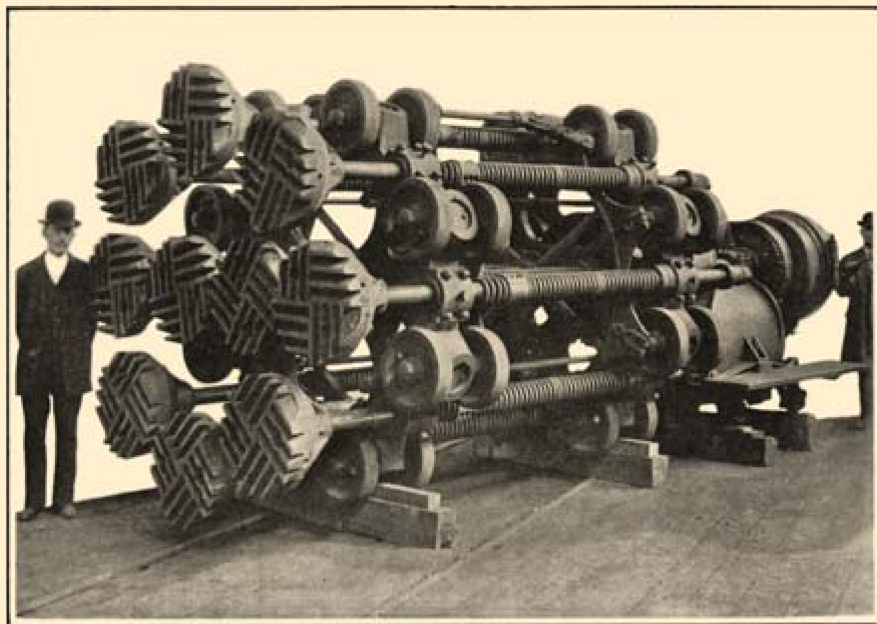
...cincuenta años

El color de la luz. «Ningún estudioso de la visión del color puede dejar de sobrecogerse ante la sensibilidad y discernimiento con que el ojo humano reacciona ante la variedad de estímulos que recibe. En fecha reciente, mis colaboradores y yo hemos descubierto que se trata de un mecanismo mucho más prodigioso de lo que se creía. El ojo distingue con una sutileza asombrosa. No necesita toda la información aferente desde el mundo cotidiano. Construye su propio mundo de colores con unos materiales informativos que siempre se supusieron de por sí sosos e incoloros. —Edwin H. Land» [fundador de Polaroid Corporation]

"Culto al cargo". «En las tierras altas de la Nueva Guinea central la brusca transición del hacha de piedra a la sociedad de los barcos de vela (y hoy de los aviones) no ha sido sencilla. Conforme los agentes del gobierno australiano penetran en valles montañosos cada vez más remotos, se encuentran con unos remansos de la antigüedad ya profundamente perturbados por el contacto con las ideas y los artefactos de la civilización europea. Ocurre que el "cargo" —"artículos comerciales" en inglés *pidgin*— viene circulando desde hace tiempo por los canales de comunicación indígenas del litoral a la jungla. Esas gentes son las últimas que fueron atrapadas por el frenesí religioso recurrente de los "cultos al cargo". Tales cultos, por mucho que los mitos indígenas y el cristianismo traten de adornarlos de modos diversos, fomentan todos la misma idea: el mundo está a punto de acabar en un terrible cataclismo. Entonces Dios, los antepasados o algún héroe de una cultura local aparecerá e inaugurará en la Tierra un paraíso maravilloso.»

...cien años

Excavadora mecánica. «Nunca faltan nuevas ideas para abrir túneles en roca maciza y acabar con las perforaciones, el polvo y las voladuras peligrosas. Desde 1853 se han concedido nada menos que sesenta y nueve patentes de máquinas tuneladoras. La que se muestra en la fotografía fue construida en el Este y enviada a Georgetown (Colorado). Lista para trabajar, pesa 29 toneladas. Su enorme armazón soporta diez grandes cabezales trituradores. La máquina no corta la piedra, la pulveriza. Se afirma que si cada cabezal avanza a cada golpe el grosor de una hoja de papel, el progreso será de unos veinticinco milímetros por minuto.»



Tuneladora que se abre camino en roca maciza, 1909.

Comunicación extraterrestre. «Una gran excitación ha creado la propuesta del profesor Pickering de construir un sistema de espejos, mediante el cual podrían enviarse señales luminosas rítmicas a Marte. Según el profesor Pickering, un sistema de superficies reflectoras de área suficiente podría construirse al costo de diez millones de dólares. ¿Valdría la pena llevar a la práctica la idea? Si se recibiera una señal de respuesta, no sería exagerado afirmar que el evento trascendería en interés e importancia a los acontecimientos más sensacionales de la historia de la Tierra e inauguraría una nueva era en el progreso de la raza humana. Incluso ante posibilidad tan atractiva, aunque sumamente remota, nos parece que una suma de diez millones de dólares podría gastarse más provechosamente en otras cosas.»

...ciento cincuenta años

¿Lujos de la recesión? «Un individuo habilidoso, de Liskeard (Cornualles, Inglaterra), estuvo durante algún tiempo mostrándose con una vestimenta confeccionada del todo, de arriba a abajo, con las pieles de rata que había estado reuniendo durante tres años y medio. El indumento, hecho por él mismo, se compone de sombrero, pañuelo de cuello, chaqueta, chaleco, pantalones, bufanda, polainas y anteojos. El número de ratas necesarias para terminar el indumento fue de seiscientas setenta; el individuo, vestido con él, parece uno de los esquimales descritos en los viajes de Perry y Ross.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. C, N.º 21; 22 DE MAYO DE 1909

¿Qué ha sido de ...?

Recopilación de Philip Yam

Ultimos instantes de la *Columbia*

Los últimos minutos de la lanzadera espacial *Columbia*, que se desintegró en su retorno a la atmósfera el 1 de febrero de 2003, ofrecen enseñanzas para futuros vehículos. La NASA emitió su informe definitivo sobre la tripulación el pasado 30 de diciembre. Aunque no había posibilidad alguna de que nadie sobreviviera al accidente, la NASA ha descubierto varias deficiencias en seguridad.



EL ULTIMO ADIOS: Los siete miembros de la tripulación de la *Columbia* no hubieran tenido la más mínima oportunidad de sobrevivir aunque todos los dispositivos de seguridad hubieran funcionado.

Basándose en análisis de vídeos, restos recuperados, hallazgos médicos y modelos informáticos, los investigadores han concluido que la tripulación dispuso de unos 40 segundos para hacerse cargo de la situación y actuar, antes de perder la consciencia por la despresurización de la cabina. Al fallar las sujeciones de los hombros, el torso de los tripulantes sufrió bruscas oscilaciones al girar la cabina sin control. A diferencia de los cascos de los motoristas, los yelmos de las escafandras no se ceñían a la cabeza de los astronautas, por lo que ofrecían escasa protección contra impactos. El informe afirma que los movimientos incontrolados ocasionaron "lesiones y traumatismos mortales".

En el informe se recomiendan diversas modificaciones para nuevas naves espaciales; entre ellas, sujeciones más seguras y paracaídas que no tengan que ser activados por una tripulación consciente. Y lo que reviste mayor importancia, la NASA debe incorporar sistemas de seguridad en el diseño desde el primer momento (los trajes presurizados no se introdujeron hasta después del accidente de la *Challenger* en 1986). Este informe aleccionador, de 400 páginas, puede consultarse en www.nasa.gov/news/reports/index.html.

Cuadrúpedos-farmacia

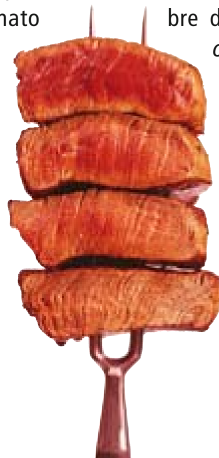
Una comisión asesora de la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos estadounidense aprobó el 9 de enero un fármaco producido por animales transgénicos: cabras pertenecientes a la compañía GTC Biotherapeutics, de Framingham, en Massachusetts. Esas cabras generan una proteína humana, la antitrombina, que inhibe la coagulación. El fármaco (Atryn) se aprobó en Europa en 2006 [*véase* "Fármacos transgénicos"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero, 2006]. La compañía afirma que 150 de esas cabras transgénicas producirían anualmente 100 kilogramos de fármaco proteínico a un costo de decenas de millones de dólares. En comparación, un sistema biotécnico al uso, mediante células de mamífero cultivadas en cuba, supone inversiones de cientos de millones. Las organizaciones de consumidores reclaman precaución; proponen que la FDA garantice que las cabras no se incorporen a la producción de alimentos. La FDA otorgó su aprobación definitiva a principios de febrero. *—Charles Q. Choi*



BUSQUE SU CABRA: La leche de estas cabras, genéticamente modificadas, contiene un agente anticoagulante humano.

Sabrosa sensación

El quinto sabor, llamado *umami*, de existencia discutida, ha ido ganando en credibilidad desde su descubrimiento, en 1908, por el químico japonés Kikunae Ikeda. La mayoría de los expertos consideraba que se trataba de una mezcla de los otros cuatro sabores [*véase* "Potenciadores del sabor", INVESTIGACIÓN Y CIENCIA; octubre, 2008]. Pero a lo largo del último decenio, una serie de investigaciones han sacado a la luz detalles sobre la forma en que el receptor se hace con el glutamato (sustancia presente en alimentos ricos en proteínas como la carne, el pescado y las legumbres) y produce una sensación sabrosa. Un estudio reciente muestra el súbito cierre del receptor —cuya forma guarda semejanza con la planta carnívora Venus— sobre el glutamato y el modo en que otras dos moléculas actúan de potenciadores del umami, pues al unirse cerca del receptor hacen que el glutamato se mantenga más tiempo en el interior del mismo. El estudio aparece en el número de 30 de diciembre de 2008 de *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. *—Kate Wilcox*



¡MMM...! ¡Umamilicioso...!

Rotar para nadar

Una de las ambiciones de la nanotecnia es la creación de un micromotor que se impulse por el interior de los vasos sanguíneos o por los conductos de microchips. Mas, a esa escala, la viscosidad de los fluidos dificulta sobremanera la realización de tales dispositivos [*véase* "Máquinas nanométricas antiguas y futuras"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre, 2001]. Un equipo integrado por científicos de la Universidad de Barcelona y de la Universidad de Sheffield ha construido micronadadores a partir de perlitas de un material plástico-magnético. Utilizaron una corta hebra de ADN para conectar una perla de 2,8 micras de diámetro con otra (u otras) de 1 micra. Un campo magnético hace girar las cuentas, desplazándolas así a través de estrechos canales, según se informa en el *Journal of Chemistry B*, de 25 de diciembre de 2008.

NASA *Getty Images (tripulación de la Columbia)*; EMILY HARRISON *(cabras)*; ARNOLD ZABERT *Getty Images (carne)*

ESPACIO

Gusanos de seda, comida de astronautas

Los viajes interplanetarios requerirán, probablemente, que los astronautas lleven consigo sus propios ecosistemas, como fuente de alimentos y oxígeno. Los estudios realizados en el pasado sobre los posibles alimentos espaciales han considerado la posibilidad de llevar pollos, peces e incluso caracoles, salamandras y larvas de erizos de mar, pero todas esas opciones tienen sus inconvenientes. Los pollos, por ejemplo, requieren gran cantidad de comida y espacio, y la vida acuática es muy sensible a unas condiciones del agua que podrían ser difíciles de mantener.



LOS GUSANOS DE SEDA podrían constituir un alimento nutritivo y práctico en el espacio.

Un grupo de científicos de la Universidad de Beihang (Pekín), sugiere utilizar los gusanos de seda, que se comen en algunas partes de China. Estos insectos se reproducen muy rápidamente, apenas requieren espacio, comida o agua, y sólo producen cantidades minúsculas de excrementos, que podrían utilizarse como fertilizante para las plantas de a bordo. Las pupas de gusanos de seda, que están formadas principalmente por proteínas comestibles, contienen el doble de aminoácidos que el cerdo y cuatro veces más que los huevos y la leche. Este grupo de científicos también señala que ciertos procesos químicos podrían conseguir incluso que la seda fuera comestible.

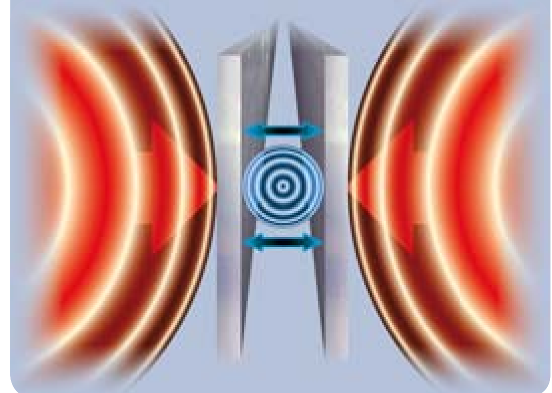
—Charles Q. Choi

FISICA

Fluctuaciones repulsivas

Un grupo de físicos ha detectado un nuevo efecto resultante de las fluctuaciones cuánticas que impregnan el espacio vacío: la forma repulsiva de la fuerza de Casimir, que normalmente hace que dos placas metálicas muy cercanas se atraigan ligeramente. La versión repulsiva puede producirse cuando las superficies están hechas de materiales con diferentes propiedades eléctricas (en el caso del experimento, sílice y oro). Como indicaban las predicciones, las fluctuaciones cuánticas hicieron que los materiales se repeliesen. Un estudio más profundo del efecto, que sólo se puede observar a escala nanométrica, podría resultar muy útil para los ingenieros dedicados a la fabricación de dispositivos mecánicos muy pequeños.

—John Matson



BIOLOGIA

¿Qué le ocurre al ADN del donante en una transfusión de sangre?

Hay estudios que demuestran que el ADN del donante persiste en el receptor de una transfusión de sangre durante varios días, más tiempo a veces, pero no es probable que su presencia altere significativamente las pruebas genéticas. Los glóbulos rojos, que son los componentes principales de las transfusiones, carecen de núcleo y de ADN. Pero la sangre transfundida alberga una importante cantidad —del orden de mil millones por unidad de sangre, es decir, 450 mililitros— de glóbulos blancos, o leucocitos, los cuales sí contienen ADN. E incluso los componentes sanguíneos que han sido filtrados para eliminar los glóbulos blancos del donante pueden contener millones de leucocitos por litro.

Los investigadores han detectado ADN del donante después de la transfusión mediante la reacción en cadena de la polimerasa (RCP), que amplifica minúsculas cantidades de material genético para detectar e identificar genes específicos. Estudios que se han valido de la RCP para amplificar los genes masculinos en receptoras de transfusiones con donantes masculinos han mostrado que el ADN del donante perdura en las receptoras hasta siete días. Y se ha visto en pacientes femeninas de traumatismos que recibieron transfusiones cuantiosas la presencia de leucocitos de los donantes hasta año y medio después.



A todos esos resultados se llegó, no obstante, con técnicas de gran sensibilidad, que amplificaban el ADN del donante con respecto al mucho más abundante ADN del receptor. En estudios en los que se amplificaron genes comunes a donantes y receptores, los resultados reflejaron el predominio del ADN propio del receptor de la transfusión, lo que muestra que el ADN del donante es un intruso no demasiado importante.

—Michelle N. Gong,
Escuela de Medicina de Monte Sinaí

STEPHEN DALTON *Minden Pictures (gusano de seda)*; ©*iStockphoto*/FREDDIE VARGAS *(bolsa de sangre)*

FISIOLOGIA

Aire enrarecido de montaña



Los escaladores que llegan a la cima del monte Everest tienen tan poco oxígeno en su sangre como quien sufre un paro cardíaco en la costa, o incluso como el que se ha muerto ya. Cuatro médicos del Colegio Universitario de Londres subieron al Everest y tomaron muestras de su propia sangre para analizarla. Encontraron que, debido a la altitud, tenían un veinticinco por ciento menos de oxígeno en la sangre de lo que es corriente a nivel del mar. El análisis confirmó también otros efectos de la altitud, como el aumento de la hemoglobina, para transportar la máxima cantidad de oxígeno posible. Además de ayudar a los escaladores, los resultados del estudio podrían abrir el camino a mejores tratamientos para pacientes que, más a ras de suelo, padecen enfermedades cardíacas o pulmonares y les falta el oxígeno.

—Jordan Lite

DESOXIGENADOS: El nivel de oxígeno en sangre de los escaladores es similar al de quien sufre una parada cardíaca.

MEDICINA

Proteínas para la vista

Una proteína, la histona deacetilasa 4 (HDAC4), que regula el desarrollo óseo y muscular, favorece también una visión sana, según un grupo de investigadores de la Escuela de Medicina de Harvard. La reducción de los niveles de esta proteína en los ojos de ratones de laboratorio provocó la muerte de algunas células de la retina, en particular bastones fotorreceptores y células bipolares, que transmiten las señales desde los fotorreceptores al nervio óptico. El aumento de los niveles de la proteína hizo que disminuyera la muerte natural de las células bipolares y prolongó la vida de los fotorreceptores en ratones con ojos enfermos.



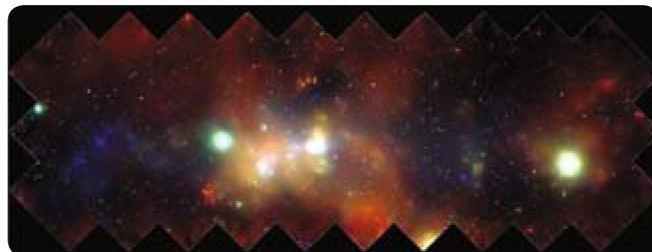
—Charles Q. Choi

ASTRONOMIA

El huevo y la gallina galácticos

Las galaxias y los enormes agujeros negros de sus centros concuerdan entre sí como si las unas estuvieran hechas para los otros. ¿Se formaron primero los agujeros, y éstos guiaron la formación de sus galaxias? ¿Se formaron primero las galaxias y provocaron la creación de agujeros negros? ¿Hubo un factor común que explica el desarrollo de ambos? Christopher Carilli, del Observatorio Nacional de Radioastronomía de EE.UU., y sus colaboradores defienden que primero fueron los agujeros negros. Encontraron que las galaxias del universo primitivo tenían una masa treinta veces mayor que la de sus agujeros negros, mientras que las galaxias actuales alcanzan una masa mil veces mayor. “Los agujeros negros aparecieron primero y, por una vía que desconocemos, las galaxias se formaron en torno a ellos”, afirmó Carilli. Otros astrónomos se preguntan si las galaxias primitivas no parecerán más pequeñas debido a un efecto de selección estadística. Aun cuando el estudio estuviera en lo cierto, no explica cómo puede un agujero negro formar una galaxia, ya que más bien debería romperla en pedazos.

—George Musser



EL AGUJERO NEGRO del centro de la Vía Láctea acecha en la mancha blanca brillante situada en el núcleo de este mosaico de imágenes tomadas por el Observatorio Chandra de Rayos X.

PERCEPCION

Explicación de la ilusión de la abertura

Una barra inclinada que se mueva de la izquierda a la derecha parecerá moverse hacia abajo en ángulo si la observamos a través de un agujero. Dale Purves y sus colaboradores, de la Universidad Duke, creen que han averiguado la causa. Pidieron a unos voluntarios que describieran cómo percibían el movimiento de varias líneas al mirarlas a través de una ranura. Acometieron también simulaciones informáticas de una barra virtual que se movía en el espacio tridimensional, eliminando la información relativa a su dirección (proyectaban el movimiento sobre una superficie bidimensional). La forma en que los voluntarios percibían el movimiento se ajustaba de manera casi perfecta a la simulación bidimensional, lo cual sugiere que las imágenes formadas en nuestras retinas, que son prácticamente bidimensionales, no transmiten aspectos relativos al movimiento tridimensional. Por lo tanto, nuestras percepciones de las direcciones de objetos en movimiento son construcciones mentales basadas en la experiencia.

—Charles Q. Choi

AXIOM PHOTOGRAPHIC AGENCY *Getty Images (monte Everest)*; STEVE DUNWELL *Getty Images (ojo)*; CORTESIA DE NASA Y D. WANG ET AL. *Universidad de Massachusetts (Vía Láctea)*

Poliformismo y sobredominancia en el genoma humano

¿Por qué persiste la variabilidad genética dentro de una población?

A Darwin le hubiera parecido extraña la existencia de fuerzas selectivas que tiendan a promover, o a estabilizar siquiera, la diversidad dentro de una población. Entendía que la evolución por selección natural implicaba que la forma más apta acababa reemplazando a las demás. Con ello explicaba la variación geográfica y temporal de las especies. Sin embargo, una de las observaciones más sorprendentes en biología evolutiva ha sido la de la abundante variabilidad genética, el "polimorfismo", de la mayoría de las poblaciones de cualquier especie: en ellas coexisten distintas versiones, o alelos, de la mayoría de los genes. ¿Cuáles son las fuerzas evolutivas que consiguen estabilizar dicha diversidad? La mutación recurrente no parece ser la explicación: requeriría tasas de mutación varios miles de veces superiores a las observadas.

Para los neodarwinistas, conocedores de las leyes de Mendel y de los procesos mutacionales, la selección natural puede generar diversidad mediante cierto tipo de selección equilibradora, la denominada "sobredominancia". En la sobredominancia, los individuos heterocigotos para un gen, es decir, que tiene dos versiones distintas del gen en cuestión (lo que se simboliza con la notación A/a, donde *A* es un alelo y *a* otro) presentan ventajas durante la selección natural frente a los individuos homocigotos (que tienen dos versiones iguales, A/A, a/a). Theodosius Dobzhansky, al que se debe la famosa frase "Nada en biología tiene sentido si no es a la luz de la evolución", fue un férreo defensor de la prevalencia de la sobredominancia en las poblaciones naturales. Su opinión se dejó sentir entre los genetistas de poblaciones.

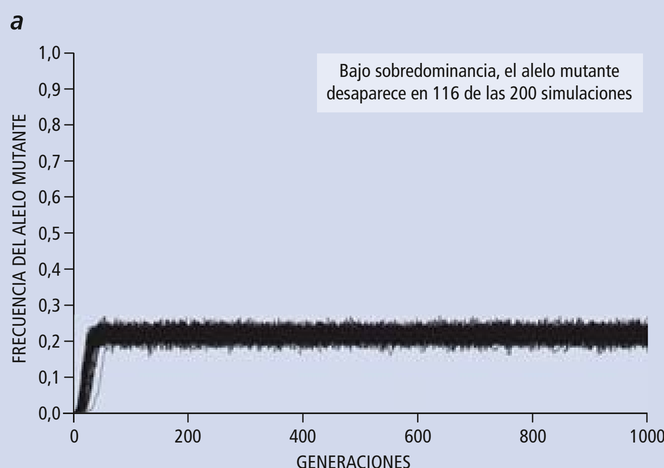
Un ejemplo que apoya la existencia de sobredominancia en humanos lo constituyen los alelos Hb^A y Hb^B del gen de la β-globina de la sangre. En algunas poblaciones africanas donde la malaria es endémica, los heterocigotos Hb^A/Hb^S poseen una resistencia frente a la malaria que es mayor que la que representan los homocigotos Hb^A/Hb^A, mientras que los homocigotos Hb^S/Hb^S experimentan anemia severa, dado que el alelo Hb^S produce una globina defectuosa. Este polimorfismo se mantiene en tales poblaciones gracias a ese conflicto de intereses.

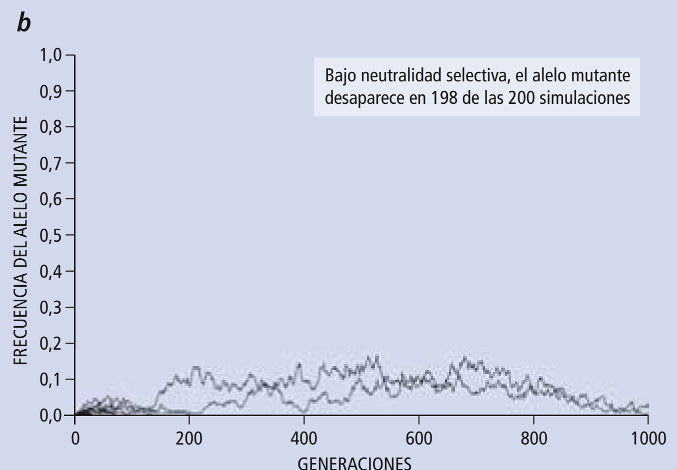
Para otros, la gran diversidad genética en el nivel molecular resultaba incompatible con las teorías neodarwinistas, ya que la mayoría de los polimorfismos no parecían ir acompañados de un cambio fenotípico visible, ni parecía observarse una correlación obvia con las condiciones ambientales.

Para explicar la diversidad intrapoblacional, Motoo Kimura desarrolló hace unos cuarente años la "teoría neutra de la evolución molecular", según la cual la mayoría de las mutaciones son neutras a los efectos de la selección natural (o casi neutras): ésta ni las favorece, ni las perjudica. Por lo tanto, la diversidad (heterocigosidad) se pue-

EVOLUCION DE UN ALELO

Estas gráficas muestran simulaciones de la evolución de un alelo mutante bajo sobredominancia y bajo neutralidad. En ambas gráficas se representan 200 simulaciones durante 1000 generaciones; el nuevo alelo mutante surge en la generación 0. Su frecuencia inicial es, por lo tanto, 1/2N, siendo N el número de individuos, 1000. En *a*, los coeficientes de selección son 0,79 para el homocigoto silvestre, 1 para el heterocigoto y 0,25 para el homocigoto mutante (una situación similar al caso de Hb^A/Hb^A, Hb^A/Hb^S y Hb^S/Hb^S) En *b*, se presupone la neutralidad selectiva (todos los coeficientes igual a 1). Debe observarse que bajo sobredominancia (*a*) el alelo mutante desaparece por efecto de la deriva al cabo de unas 20 generaciones en aproximadamente el 57 % de las simulaciones, pero si logra sobrevivir alcanza una frecuencia estable de alrededor de 0,2 alrededor de la generación 50. Bajo neutralidad (*b*), ya para la generación número 20 el alelo mutante se pierde en aproximadamente el 90 % de las simulaciones; en los casos en que sobrevive, la frecuencia no se estabiliza.





de discriminar olores con estructuras moleculares similares. Finalmente, en ovejas, la heterocigosidad en *BMP15* y *GDF9* parece estar relacionada con una mayor fertilidad.

Coeficientes de selección

El coeficiente de selección es una forma de medir el grado en que la selección natural favorece o no a un determinado genotipo en comparación con otro de referencia, del mismo locus, o posición en un cromosoma cuyo coeficiente es 1. Si el coeficiente vale cero, no hay diferencia entre el tamaño de la descendencia fértil de los individuos con un genotipo y el otro: la selección es neutra entre ambos genotipos. Si el coeficiente vale uno, el genotipo no deja descendencia fértil: la selección es letal para ese genotipo. Un valor intermedio, 0,25 por ejemplo, indica que el genotipo en cuestión tiene una descendencia fértil (1-0,25) veces tan grande como la descendencia del genotipo de referencia.

de mantener gracias a un equilibrio entre la introducción de nuevos alelos por mutación y la pérdida de alelos por deriva genética, que depende del tamaño, finito, de la población: cuanto mayor sea el tamaño poblacional, más difícil será que el azar haga que un alelo desaparezca de la población en un tiempo dado.

Así pues, ¿tenemos en la sobredominancia la fuerza *principal* que mantiene la diversidad? Durante mucho tiempo el único ejemplo de sobredominancia en los libros de texto fue el de las variantes de la hemoglobina con respecto a la malaria. Hoy en día podemos citar algunos más, aunque no todos tan ampliamente aceptados. Sin pretender ser exhaustivos, entre los casos propuestos de sobredominancia podemos mencionar, en humanos, el del gen *CFTR,* en el que un alelo mutante que en homocigosis causa fibrosis quística parece ofrecer ventaja cuando se presenta en heterocigosis junto con el alelo normal. Dicha ventaja se basaría en ofrecer una mayor resistencia al tifus o al asma.

Además, en el sistema principal de histocompatibilidad la heterocigosidad parece ofrecer una ventaja selectiva al aumentar la resistencia a las enfermedades infecciosas, aunque esta relación pudiera ser más de dominancia que de sobredominancia, es decir, de un alelo que impide la expresión de los otros con los que vaya asociados en individuos heterocigotos. Entre los fore de Papúa Nueva Guinea, un polimorfismo del gen *PRNP* parece ofrecer resistencia en heterocigosis al kuru, una enfermedad priónica, del tipo de la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob, causada al parecer por la práctica de canibalismo. La heterocigosidad en *CCR5* parece que está asimismo relacionada con la susceptibilidad a HIV-1, en concreto con un retraso en el desarrollo de la enfermedad (el sida). Similarmente, los heterocigotos para el gen *MBL2* parecen estar más a salvo de un desenlace fatal con posterioridad a una estancia en la UCI de un hospital.

Nosotros también hemos investigado la contribución de la sobredominancia a la evolución reciente de nuestra especie. Hemos encontrado que la diversidad de una parte sustancial de genes cuya función molecular se corresponde con la "actividad receptora olfativa" puede haberse mantenido gracias a la sobredominancia. Nos hace pensar que la pérdida de receptores olfativos en la especie humana (en comparación con otros primates o con el ratón) puede haber ido acompañada de un incremento en la capacidad de discriminar olores con estructuras moleculares similares.

Aunque nos hemos dejado algunos casos más en el tintero, la verdad es que no abundan los ejemplos en los que el heterocigoto ofrezca una clara ventaja selectiva, en parte por la dificultad intrínseca de estimar en poblaciones naturales los coeficientes de selección para homocigotos y heterocigotos, o porque no se alcanza a comprender cuáles son los mecanismos por los que los heterocigotos resultan ventajosos. En otros casos resulta difícil poder discriminar la acción de la sobredominancia de la de otros tipos de selección equilibradora, tales como la selección negativa dependiente de la frecuencia —los alelos menos frecuentes tienden a ser favorecidos en la selección—, o la selección direccional variable, que tiende a hacer variar la frecuencia de los alelos en función del tiempo, del lugar geográfico o de ambos.

¿Es entonces la sobredominancia la fuerza *principal* que mantiene la diversidad? Quizás hoy ésta sea una pregunta demasiado teórica para los tiempos que corren, pero sin duda la sobredominancia existe y es importante. Por ello debemos seguir investigando, porque la identificación de más ejemplos de sobredominancia nos ofrecerá una gran oportunidad de conocer no sólo la historia de las adaptaciones de nuestra especie (o de otras especies), sino también la identificación de variantes de riesgo para algunas de nuestras enfermedades.

Santos Alonso
Departamento de Genética
Facultad de Ciencia y Tecnología,
Lejona (Vizcaya)

Babosas marinas invasoras

Invaden nuevos hábitats siempre que encuentren allí el alimento necesario para sintetizar toxinas defensivas

Por especies introducidas debemos entender las que han sido transportadas, de forma directa o indirecta, por la acción humana lejos de su área de origen. En el medio marino, las principales vías de introducción de especies corresponden al tráfico marítimo (a través del casco de los barcos o de sus aguas de lastre) y a la acuicultura. Muchas de las especies que por estas u otras vías llegan a lugares alejados de su región de origen no se adaptan al hábitat receptor y desaparecen al poco tiempo. Otras, en cambio, logran reproducirse y prosperar en el nuevo ambiente; nos referimos a las "especies introducidas establecidas". En muchos casos, se integran como un elemento más de la comuni-



La babosa marina *Haminoea cyanomarginata*, procedente del mar Rojo, ha invadido algunas zonas del Mediterráneo oriental y central. Su coloración aposemática advierte a los depredadores de la posesión de defensas químicas.

dad biológica de acogida; pero en ciertas ocasiones prosperan en exceso: se convierten en dominantes, desplazan a especies endémicas y alteran el hábitat receptor. Hablamos entonces de "especies invasoras".

En los últimos decenios, el fenómeno de las invasiones biológicas ha adquirido una dimensión creciente; hoy día se considera parte del "cambio global", o conjunto de alteraciones que se producen en el planeta Tierra por la acción humana. Las invasiones biológicas causan importantes daños ecológicos y económicos; asimismo, provocan una pérdida y una homogenización de la biodiversidad a escala planetaria.

Entre los mares europeos, el Mediterráneo es el que sufre con mayor intensidad el fenómeno de las bioinvasiones, pues a las vías de introducción de especies antes mencionadas se añade el flujo de organismos marinos que, procedentes del mar Rojo y del Indo-Pacífico, penetran en este mar por el canal de Suez, abierto en 1869. Nos referimos a la migración lessepsiana, que tiene un impacto mayor en el Mediterráneo oriental.

Bioinvasiones en el Mediterráneo

Hasta la fecha se conocen en el Mediterráneo unas 800 especies introducidas, de las cuales casi la mitad se consideran establecidas. Alrededor del 65 por ciento de ellas proceden del mar Rojo o del Indo-Pacífico, y han llegado a través del Canal de Suez. Las especies introducidas suponen en la actualidad cerca del 5 por ciento de la biodiversidad del Mediterráneo, proporción que alcanza el 15 por ciento en la cuenca más oriental. Desde principios del siglo pasado, el número de especies introducidas viene duplicándose cada veinte años.

A pesar de haberse intensificado los estudios sobre especies introducidas, no hemos progresado apenas en el conocimiento de los factores que posibilitan que una especie foránea prospere en un ambiente nuevo. Es preciso ahondar en las características de las especies introducidas, así como en las condiciones requeridas en el medio receptor para que estas especies se adapten a él. Suele afirmarse que los ambientes alterados, cuya biodiversidad original se encuentra mermada, son los más propicios para el establecimiento de especies introducidas. A su vez, las especies con mayor éxito invasor son las oportunistas, las que poseen una amplia valencia ecológica y están capacitadas para adaptarse a un amplio rango de condiciones ambientales. Aun así, algunas especies tropicales, con un alto grado de especialización y unos requerimientos alimentarios estrictos, han logrado establecerse en el Mediterráneo.

Babosas marinas

Es el caso de algunos opistobranquios, o babosas marinas, un grupo de gasterópodos caracterizado por su tendencia a la reducción o pérdida de la concha. Dicha defensa mecánica es sustituida en ellos por una serie de estrategias, sobre todo por la defensa química. Se ha detectado en estos gasterópodos la presencia de una amplia gama de sustancias defensivas (metabolitos secundarios) con características estructurales peculiares, resultado de un proceso de radiación adaptativa (evolución a partir de una especie primitiva, que origina diferentes especies como consecuencia de su adaptación a formas de vida distintas). Estos compuestos suelen derivar de su dieta; pueden ser transformados por el mismo animal o sintetizados *de novo*. La identificación química de los mismos permite a menudo obtener información sobre especializaciones alimentarias y estrategias defensivas.

Se conocen en el Mediterráneo más de una veintena de babosas marinas introducidas, algunas de las cuales muestran una creciente expansión desde la cuenca más oriental hacia las zonas centrales. Una de ellas, *Bursathella leachi*, ya ha alcanzado la costa española y puede llegar a tener un carácter invasor. En fecha reciente, un equipo multidisciplinar formado por químicos orgánicos, biólogos y ecólogos marinos de varios países ha comenzado a estudiar la ecología química del proceso de invasión de estos moluscos.

Hace pocos años se encontraron en las costas griegas tres especies del grupo, que se sospechaba que procedían del mar Rojo; en poco tiempo han ocupado buena parte del Mediterráneo oriental y central. Al estudiar los metabolitos secundarios producidos por estas tres especies, se descubrieron cinco compuestos tóxicos que tales organismos utilizan para defenderse de los depredadores.

Se ha demostrado que, para que se produzca una invasión de una de esas babosas marinas, son necesarias dos condiciones: que exista en el área receptora el alimento requerido para la síntesis de los compuestos defensivos y que éstos sean eficaces frente al nuevo elenco de depredadores. Este estudio abre la puerta a un novedoso campo de investigación sobre la invasión del medio marino por especies foráneas.

José Templado González
Museo Nacional Ciencias Naturales, CSIC

FOTOGRAFIA DE JOSE RAFAEL GARCIA MARCH

Genética de los neandertales

El gen del grupo sanguíneo 0 recuperado en neandertales de El Sidrón podría estar asociado a la resistencia a enfermedades

El estudio de la evolución de los grupos sanguíneos en especies fósiles es de gran ayuda para conocer qué fuerzas selectivas han modelado la evolución de los homininos. Averiguar en qué momento y circunstancias de la historia evolutiva de los humanos han surgido las variantes génicas que determinan los grupos sanguíneos nos aproxima al conocimiento de la relación entre ellas y determinados agentes patógenos del pasado.

Gracias al estudio realizado en la cueva asturiana de El Sidrón, en Borines, sabemos hoy que dos neandertales masculinos que vivieron hace más de 43.000 años eran del grupo sanguíneo 0. ¿Cuál es el significado de este sorprendente hallazgo?

Los glóbulos rojos de la sangre (eritrocitos) y otras células epiteliales alojan en su membrana celular carbohidratos que operan a modo de antígenos, es decir, que pueden provocar una reacción inmunitaria. Salvo raras excepciones, todos los humanos tenemos en la membrana de nuestros eritrocitos el antígeno precursor H. El grupo sanguíneo depende del tipo de molécula que se añade a este antígeno H.

Los humanos contamos con tres variantes del sistema genético AB0, que determinan cuatro grupos sanguíneos: A, B, AB y 0. El grupo AB0 suele determinarse mediante una reacción inmunitaria antígeno-anticuerpo: la que se produce cuando unos anticuerpos conocidos (anti-A y anti-B) entran en contacto con la muestra de sangre que se quiere tipificar. Si el anticuerpo reconoce al antígeno, se produce una reacción de aglutinación, que se observa a simple vista.

Los individuos del grupo 0 no tienen antígenos en la membrana de sus glóbulos rojos, por lo que no aglutinan ni con el anticuerpo anti-A ni con el anti-B. El carecer de antígenos podría implicar una mayor resistencia a ciertas enfermedades, como la malaria severa, en individuos del grupo 0, ya que algunos patógenos emplean estos antígenos como puntos de reconocimiento de la célula que van a infectar.

Sabemos ya el gen implicado en el grupo sanguíneo AB0. El gen *AB0*, alojado en el cromosoma 9, codifica la enzima glicosiltransferasa, que cataliza la síntesis del azúcar N-acetil galactosamina (en los individuos del grupo A) o de la galactosa (en los del grupo B) en la membrana de los eritrocitos. La mayoría de las personas del grupo 0 lo son por una mutación en la posición 261 del



◀ **1. Para evitar la contaminación por ADN humano moderno, la extracción de fragmentos de hueso se realiza con trajes de laboratorio estériles. Así lo exige el protocolo para la extracción limpia de huesos fósiles.**



▲ **2. Extracción de muestras en el laboratorio de arqueopaleontología.**

exón 6, que interrumpe la síntesis del enzima y deja los glóbulos rojos sin moléculas añadidas al antígeno precursor H.

Se han recuperado fragmentos del gen *AB0* en dos individuos de El Sidrón. Se ha descubierto que poseen la misma mutación que determina el grupo sanguíneo 0 en los humanos actuales. El hecho de que al menos algunos neandertales fueran del grupo 0 quizás indique que estaban adaptados a algún patógeno con el que habrían entrado en contacto durante su larga permanencia en Eurasia. Desconocemos la identidad de dichos patógenos, pero no tienen por qué ser los mismos que influyen sobre las poblaciones humanas actuales. Los amerindios de nuestros días, con los que los neandertales no guardan relación alguna, son mayoritariamente del grupo 0. Ello sugiere que algunos patógenos no relacionados con ambientes calurosos, como los de Africa y del sudeste asiático, podrían haber influido de manera similar en ambas poblaciones.

Los resultados demuestran que la mutación que define el grupo 0 es compartida por los neandertales y los humanos modernos. Debió, pues, heredarse de un antepasado común. Se ha calculado que los linajes de neandertales y humanos modernos se separaron hace al menos medio millón de años. ¿Cuándo se produjo la mutación? Estimamos que debió producirse entre la separación de los linajes del chimpancé y de los humanos (hace entre 6 y 7 millones de años) y el mencionado antepasado común, que vivió hace más de medio millón de años.

El presente estudio se ha realizado en parte gracias al protocolo para la extracción limpia de huesos fósiles que se desarrolla en la excavación de El Sidrón, donde se han extraído varios fragmentos de hueso prácticamente libres de contaminación por ADN moderno. La contaminación por ADN humano moderno (por ejemplo, el ADN de los excavadores e investigadores) constituye uno de los grandes obstáculos que merman la fiabilidad de los estudios de ADN antiguo. Además de los rigurosos controles de laboratorio, el equipo de El Sidrón aplica ya en el yacimiento el "protocolo de extracción limpia", que exige el uso de trajes de laboratorio estériles. Se trata de un protocolo único. Marca un antes y un después en los métodos de excavación arqueopaleontológica. Esta ha sido una de las causas por las que El Sidrón participa en el Proyecto "Genoma Neandertal", dirigido por Svante Pääbo, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva en Leipzig.

Las muestras estudiadas proceden del yacimiento de El Sidrón, excavado bajo la dirección de Javier Fortea y la co-dirección de campo de Marco de la Rasilla, ambos de la Universidad de Oviedo. Se han recuperado hasta la fecha cerca de 1500 restos óseos humanos, de al menos nueve individuos neandertales estudiados bajo la dirección de Antonio Rosas.

Carles Lalueza Fox
Instituto de Biología Evolutiva (CSIC-UPF)
Antonio Rosas
Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid, CSIC

Quimioquinas y senescencia celular

Un insospechado mecanismo supresor de tumores

El cáncer es una consecuencia inevitable de que la evolución crease organismos pluricelulares complejos. Para protegerse, éstos desarrollaron distintos mecanismos supresores de tumores. Unos actúan globalmente; otros, como la apoptosis, o muerte celular programada, y la senescencia, constituyen programas intrínsecos que actúan en el nivel celular. La senescencia replicativa se definió en los años sesenta como la parada irreversible del ciclo celular que sufren las células normales cuando llegan al límite de su capacidad de replicarse, de dividirse en dos células nuevas.

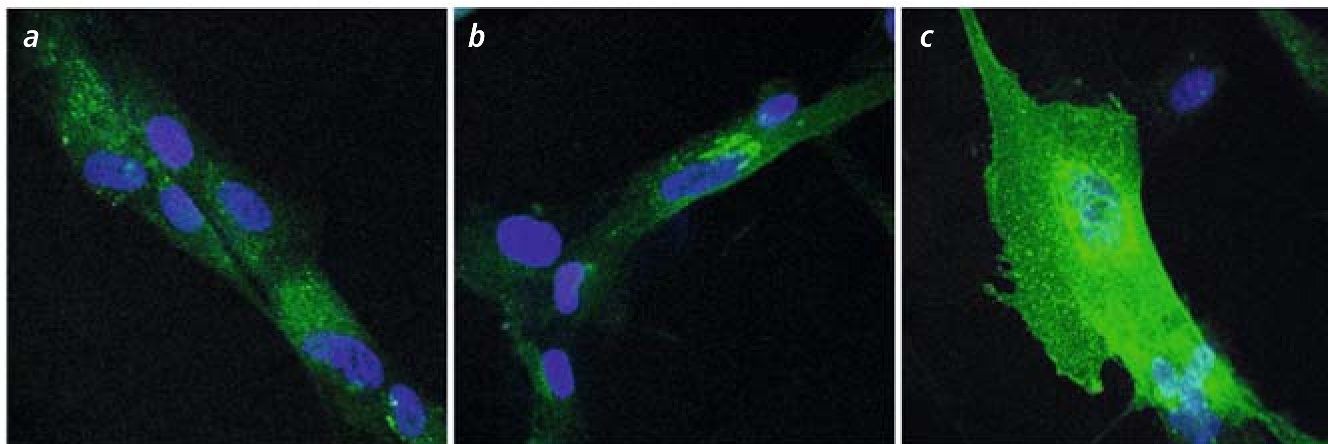
Los oncogenes son genes, relacionados con el ciclo celular, cuyo funcionamiento alterado, su "activación", contribuye a la conversión de una célula normal en cancerosa. Sin embargo, la expresión, la traducción en proteínas, de un oncogén puede también suspender el ciclo; se habla entonces de senescencia inducida por oncogenes.

El papel de la senescencia, y más concretamente de la senescencia inducida por oncogenes, como mecanismo supresor de tumores se ha confirmado al analizar ratones transgénicos que expresan oncogenes activados. En estos sistemas y en tumores humanos se ha demostrado que hay un alto porcentaje de células senescentes en lesiones preneoplásicas, pero no en tumores más avanzados. Durante la progresión tumoral, las células adquieren diversas alteraciones genéticas. La hipótesis actual es que las alteraciones genéticas iniciales de las células producen una hiperproliferación, causante de una lesión benigna, y ponen en marcha al mismo tiempo mecanismos protectores, como la senescencia.

De vez en cuando, algunas células sufrirán lesiones genéticas adicionales que les permitirán evadir la senescencia y harán que el tumor progrese. Los nevus son las lesiones benignas precursoras del melanoma y presentan un gran porcentaje de células senescentes. Se estima que sólo 1 de cada 1000 o 10.000 nevus evolucionan en melanomas. Aunque otros factores pueden influir, esto da una idea de la capacidad supresora de tumores de la senescencia.

Uno de los mecanismos desencadenantes de la senescencia replicativa es el acortamiento del ADN telomérico, resultado de la división celular. Ese acortamiento causa la pérdida del complejo proteico *shelterin*, que protege los telómeros, y activa la maquinaria de respuesta al deterioro del ADN. El mecanismo en cuestión se vale de una cascada de quinasas —enzimas que transfieren grupos fosfato a otras moléculas— para activar el supresor de tumores p53, factor de transcripción que causa la parada del ciclo celular en la fase G1.

Durante la senescencia inducida por oncogenes, los radicales libres y la replicación aberrante del ADN causan también daños en el ADN y promueven la subsiguiente activación de p53.



La expresión del gen *CXCR2*, que interviene en la regulación de la senescencia celular y quizás en la supresión de tumores, se analiza mediante inmunofluorescencia. En estas imágenes se muestran los niveles de la proteína CXCR2 (*en verde; el núcleo celular se muestra en azul*) en fibroblastos humanos infectados con un virus control (*a*), en un fibroblasto que expresa el alelo salvaje —la variante normal— de CXCR2 (*b*) y en otro que expresa el alelo mutado CXCR2^{G354W} (*c*). La proteína producida por esta mutación puede actuar como un "dominante negativo"; es decir, bloquea la acción del alelo no mutado. El alelo CXCR2^{G354W} puede aliviar la senescencia inducida por oncogenes, lo que reafirma que CXCR2 es una proteína supresora de tumores.

Otro elemento clave en el control de la senescencia es el locus *INK4a/ARF*. En condiciones normales, la expresión de este locus, la traducción de su información genética en las proteínas ARF y p16^{INK4a}, está silenciada por unos complejos represores denominados *Polycomb*. Sin embargo, en las células senescentes se induce la expresión de *INK4a/ARF*. ARF activa indirectamente el gen de p53 por medio de la regulación de la proteína Mdm2, reguladora a su vez de p53. En cuanto a p^{16INK4a}, se trata de un inhibidor de quinasas dependientes de ciclinas (CDK4 y CDK6) que contribuye a suspender el ciclo celular en la fase G1.

Debido al importante papel que la senescencia desempeña como supresora de tumores, tiene enorme interés conocer los mecanismos moleculares que la controlan.

Una estrategia para identificar genes que regulan la senescencia son los *rastreos genéticos*, que usan bibliotecas de ADN codificante o de ARN de interferencia, los pequeños fragmentos de ARN que se combina con otros de ARN mensajero e impiden su traducción en proteínas. Mediante esta técnica se ha identificado el papel en la senescencia de reguladores del locus *INK4a/ARF* (como el factor de transcripción TBX2 o la proteína Polycomb CBX7, que intervienen en el desarrollo embrionario) o de enzimas relacionadas con la ruta glicolítica (entre ellas la enzima PGM), una serie de reacciones metabólicas que producen energía a partir de la glucosa.

Recientemente, hemos expresado una biblioteca de ARN de interferencia en fibroblastos primarios humanos IMR-90 con el fin de identificar genes que regulen su capacidad de replicación en cultivo. Así, encontramos que un ARN interferente que reduce la expresión del gen *CXCR2* (también conocido como *IL8RB*) alarga la capacidad proliferativa de los fibroblastos humanos.

La proteína CXCR2 que ese gen codifica es un receptor de la interleucina IL-8 o de las moléculas relacionadas con ella GROα, GROβ y GROγ, y de otras tres quimioquinas proangiogénicas (creadoras de vasos sanguíneos). Las quimioquinas son un tipo de citoquinas, o moléculas transmisoras de señales entre células. Se caracterizan, entre otras cosas, por su pequeño tamaño y por influir químicamente en el movimiento de células cercanas.

La reducción de los niveles de CXCR2, o su inhibición, causa una disminución de la severidad de la parada celular durante la senescencia inducida por oncogenes. Aunque el mecanismo por el que CXCR2 regula la senescencia no se conoce exactamente, parece que la producción de radicales libres por CXCR2 sensibiliza la célula al deterioro del ADN y activa el gen del supresor de tumores p53. En los macrófagos, la activación de *CXCR2* constituye una señal para una oxidasa de NAPDH, que produce radicales libres. Pensamos que un mecanismo similar podría explicar el papel de CXCR2 en la senescencia.

Varias pruebas sugieren que CXCR2 puede actuar como un supresor de tumores. La producción de CXCR2, IL-8 y de otras quimioquinas se incrementa durante la senescencia inducida por oncogenes y en lesiones preneoplásicas. Además, un mutante dominante negativo de CXCR2, CXCR2^{G354W}, coexiste con una mutación activadora del oncogén B-RAF. La expresión de ese oncogén activado B-RAF^{G469A} tiene la capacidad de inducir senescencia. El alelo CXCR2^{G354W} puede actuar como un dominante negativo, es decir, bloquea la acción de la proteína del alelo no mutado de CXCR2. Nuestra hipótesis es que la expresión de este alelo mutado de CXCR2 cancela los efectos prosenescentes de B-RAF^{G469A}. Esto contribuye a confirmar que CXCR2 puede tener efectos antitumorales.

Finalmente, el papel supresor de tumores de la señalización vía CXCR2 por medio de la inducción de senescencia tiene que ser puesto en perspectiva. Por ejemplo, dos de sus ligandos, IL-8 y GROα, tienen actividades protumorales. Para comprender cuál es la contribución de las acciones promotoras de tumores y antitumorales de CXCR2 en las diferentes fases de la progresión cancerosa serán necesarias más pruebas experimentales y el recurso a modelos animales.

Juan Carlos Acosta y **Jesús Gil**
MRC Clinical Sciences Centre
Londres

El principio de

El entrelazamiento, como muchos efectos cuánticos, viola algunas de nuestras más profundas intuiciones acerca del mundo. Podría incluso minar la teoría de la relatividad especial de Einstein

David Z Albert y Rivka Galchen

CONCEPTOS BASICOS

- Sólo podemos influir directamente en aquellos objetos del universo que podemos tocar; por eso mismo, el mundo nos parece local.
- La mecánica cuántica incluye, sin embargo, acciones a distancia como consecuencia de una propiedad, el entrelazamiento, en la que dos partículas se comportan de forma sincrónica sin ningún intermediario: el mundo cuántico no es local.
- Esta no-localidad no sólo va contra la intuición; presenta además un grave problema a la teoría especial de la relatividad de Einstein y sacude así los cimientos de la física.

La intuición dicta que, para mover una piedra, hay que tocarla primero, o tocar un palo que toque la piedra, o dar una orden que se propague mediante vibraciones del aire hasta el oído de alguien que tenga un palo; o que, si no, alguna otra secuencia tendrá que haber que acabe en que algo toque la piedra. Esta intuición, una vez generalizada, nos dice que las cosas sólo pueden afectar directamente a otras que les sean contiguas. Si A afectó a B *sin* estar justo a su lado, es que lo hizo de modo *in*directo: algo tuvo que transmitirse por medio de una cadena de eventos, cada uno de los cuales llevó directamente al siguiente, hasta cubrir sin resquicios la distancia entre A y B. Cada vez que podría parecernos que hemos encontrado una excepción a esta intuición, el interruptor que enciende las luces de las calles de la ciudad, la radio por la que oímos las noticias, acabamos por comprender que no es así, que ese efecto lejano ha requerido la mediación de cables o de ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio. Al menos en nuestra experiencia cotidiana, no hay excepciones.

Llamamos a esta intuición "principio de localidad".

La mecánica cuántica destruyó muchas de nuestras intuiciones. La más profunda, ese principio de localidad; una vez derribado, la relatividad especial, piedra angular de la física del siglo xx, corre riesgo de caer tras él. El peligro no está conjurado todavía.

Visión externa

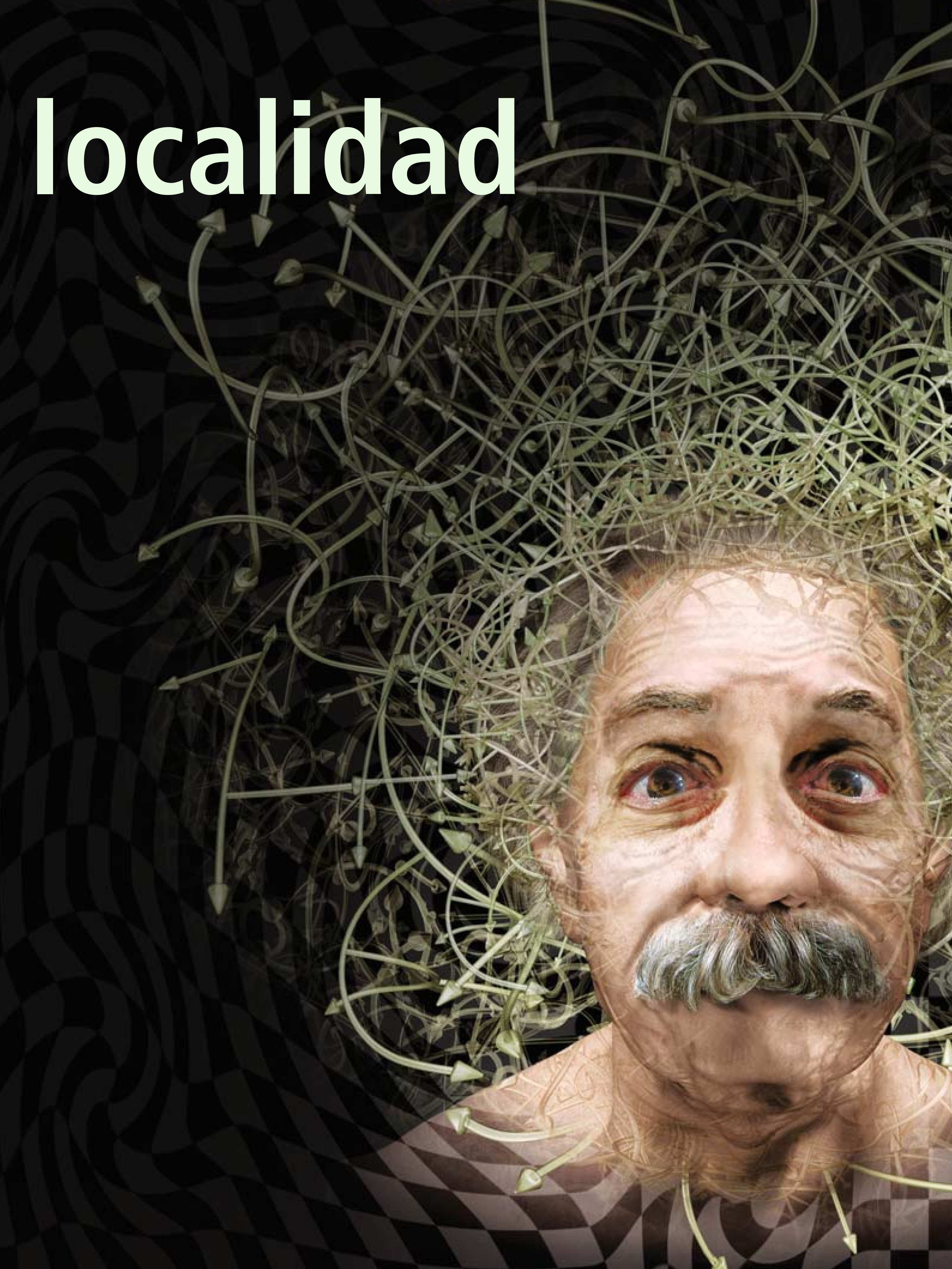
Vamos a retroceder un poco. Desde los inicios mismos de la investigación científica de la naturaleza, se creía que podríamos llegar a una descripción completa del mundo físico por medio de la descripción, uno por uno, de los constituyentes físicos más pequeños y elementales del mundo. La historia completa del mundo podría expresarse como la suma de las historias de los componentes.

La mecánica cuántica viola ese supuesto.

Las características físicas reales y mensurables de una colección de partículas pueden, de forma perfectamente determinada, superar o eludir la suma de las características de las partículas que la formen, o no tener nada que ver con ella. Así, la mecánica cuántica establece que se puede disponer un par de partículas de modo que estén precisamente a medio metro de distancia sin que ninguna de las dos partículas, por sí misma, tenga una posición definida. Además, según la manera ordinaria de entender la física cuántica, la "interpretación de Copenhague" —enunciada por Niels Bohr en las primeas décadas del siglo pasado y transmitida de profesores a estudiantes durante generaciones—, no es que no conozcamos las localizaciones exactas de las partículas individuales, sino que tales localizaciones *no existen*. Preguntar por la posición de una partícula individual tendría tan poco sentido como preguntar por el estado civil del número cinco. El problema no es epistemológico (acerca de lo que sabemos), sino ontológico (acerca de lo que es).

De las partículas interrelacionadas de esa forma se dice que están "entrelazadas" mecanocuánticamente. La propiedad objeto del entrelazamiento no tiene por qué ser la ubicación: dos partículas podrían girar en sentidos opuestos sin que ninguna de ellas girara de manera definida en sentido horario. O una de las partículas podría estar excitada sin que ninguna de ella, en concreto, fuese la excitada. El entrelazamiento puede conectar partículas con independencia de donde estén, de qué sean y de qué fuerzas se ejerzan entre ellas; en principio, podrían perfectamente

JEAN-FRANCOIS PODEVIN


localidad

El experimento mental de EPR

Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen ("EPR") señalaron que el entrelazamiento cuántico de dos partículas produce resultados inexplicables cuando dos personas que están muy lejos una de la otra (*aquí Alicia y Benito*) examinan las partículas (Alicia una, Benito la otra).

Espines cuánticos



Los electrones tienen una propiedad llamada espín, aquí representada por flechas que pueden apuntar en cualquier dirección. Cuando Alicia mide el espín de un electrón (*abajo*), elige un eje. La medición según un eje vertical arrojará que el espín del electrón apunta hacia arriba o hacia abajo de ese eje, con cierta probabilidad para cada uno. Usando un eje este-oeste, encontrará el espín apuntando al este o al oeste.

Mediciones



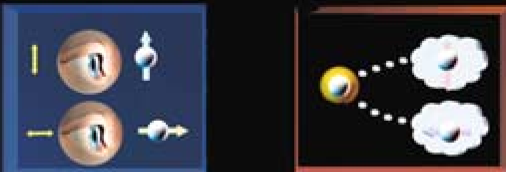
Dos partículas pueden estar entrelazadas de manera que tengan sus espines apuntando en direcciones opuestas, aunque ninguna tenga por sí misma una dirección definida. Supongamos que Alicia y Benito compartan un tal par y que Alicia encuentra que la suya tiene un espín que apunta hacia arriba (*abajo*). Independientemente de cuán lejos de Alicia estén Benito y su partícula, si Benito mide su partícula a lo largo del eje vertical, observará que el espín apunta hacia abajo, lo contrario que Alicia.

Espines entrelazados



Einstein, Podolski y Rosen sostuvieron que, debido a que Benito puede estar ciento por ciento seguro de que su medición arrojará un espín hacia abajo, el espín de su partícula debía ya estar hacia abajo, incluso antes de la medición. Pero Alicia podría igualmente haber medido a lo largo del eje este-oeste y obtenido, por ejemplo, el espín al este, lo que implicaría que la partícula de Benito ya estaba con el espín al oeste.

Argumento de EPR



Puesto que ningún estado cuántico permite que la partícula de Benito tenga el espín con certeza hacia abajo y con certeza hacia el oeste, EPR concluyeron que la mecánica cuántica debía ser una teoría incompleta.

ser un electrón y un neutrón que estuviesen en lados opuestos de la galaxia. El entrelazamiento engendra una especie de intimidad entre entes materiales que habría resultado inconcebible antes de que se formulase la mecánica cuántica.

El entrelazamiento cimienta los nuevos campos de la computación y de la criptografía cuánticas, tan prometedores: el primero quizá llegue a proporcionarnos la capacidad de resolver ciertos problemas que están más allá del alcance práctico de un computador ordinario; el segundo, la posibilidad de comunicarnos con la plena seguridad de que no se nos espía [*véase* "Computación cuántica con iones", por Christopher R. Monroe y David J. Wineland; Investigación y Ciencia, octubre de 2008; y "Procesamiento cuántico de la información", por Antonio Acín, septiembre de 2006].

Pero el entrelazamiento parece también entrañar un fenómeno hondamente misterioso y radicalmente contrario a la intuición: la "no-localidad", o posibilidad de afectar a algo sin tocarlo, o sin que se toque a una serie de entidades que cubran de un cabo al otro. La no-localidad implica que un puñetazo en Des Moines pueda romper una nariz en Badajoz sin afectar a ningún otro ente físico (ni a una molécula de aire, ni a un electrón de un cable, ni a un destello de luz) en ningún lugar de la zona interpuesta.

Lo más turbador de la no-localidad, aparte de su enorme extrañeza intrínseca, es la grave amenaza que supone contra la relatividad especial. En los últimos años, esta vieja inquietud —que por fin ha sido admitida como digna de la física— se ha convertido en el centro de debates que podrían acabar por arruinar, retorcer, reordenar o resquebrajar los cimientos de la física.

Revisiones radicales de la realidad

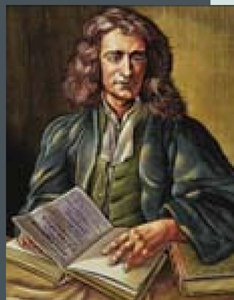
A Einstein le inquietaban varios aspectos de la mecánica cuántica. Su dicho, tan citado, sobre el carácter aleatorio de la misma, "Dios no juega a los dados", expresaba sólo una de sus

B. SANERSON *Photo Researchers, Inc.* (*Newton*); THE GRANGER COLLECTION (*aparatos de Coulomb*); ALFRED T. KAMAJIAN (*ilustraciones*)

LA NO-LOCALIDAD A TRAVES DE LOS SIGLOS

Visiones cambiantes de la "realidad"

Nuestra intuición es que el mundo es local: sólo se puede mover una piedra si se la toca directamente, con un palo o mediante la creación de una cadena continua de tales conexiones locales. Sin embargo, desde los inicios de la ciencia moderna, en el siglo XVII, violaciones aparentes del principio de localidad han venido desafiando a los científicos.



1687: la ley de la gravitación universal de Isaac Newton, la primera descripción científica moderna de la gravedad, implica una "acción a distancia". Newton se muestra convencido de que tiene que haber una descripción de la gravedad sin esta forma de no-localidad. Intenta sin éxito una teoría en la que diminutas partículas invisibles y en agitación llenan todo el espacio aparentemente vacío.

1785: Charles Coulomb introduce la ley del inverso del cuadrado de las fuerzas electrostáticas, análoga a la ley del inverso del cuadrado de la gravedad de Newton. Los efectos eléctricos parecen implicar la acción a distancia.



preocupaciones. La única objeción que articuló formalmente, la única por la que se molestó en escribir un artículo, se refería a las extrañas peculiaridades del entrelazamiento cuántico. Ese texto constituye el núcleo de lo que ahora se conoce como “argumento EPR”, por los apellidos de sus tres autores, Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen. En su trabajo de 1935 “¿Puede la descripción mecanocuántica de la realidad física considerarse completa?” respondieron a su propia pregunta con un bien motivado “no”.

Su argumento se valió de una regla de la mecánica cuántica, un algoritmo para predecir los resultados de los experimentos. Supongamos que medimos la posición de una partícula que esté mecanocuánticamente entrelazada con una segunda partícula, sin que ni la una ni la otra tengan una posición precisa. Cuando conozcamos el resultado de la medición, cambiaremos nuestra descripción de la primera partícula, porque entonces sabremos dónde estaba en ese momento. Sin embargo, el algoritmo también nos obligará a cambiar la descripción de la segunda partícula, y a cambiarla instantáneamente además, sin que importe lo lejos que esté o qué pueda haber entre las dos partículas.

Aunque el entrelazamiento era una característica incontrovertible de la imagen mecanocuántica del mundo, apenas se había reflexionado sobre sus consecuencias, antes de que Einstein lo hiciese. Vio éste en el entrelazamiento algo extraño y dudoso. Fantasmagórico. Le parecía incompatible con el principio de localidad.

Nadie en aquel momento estaba dispuesto a considerar la posibilidad de que en el mundo se incumpliera el principio de localidad; ni Einstein, ni Bohr, ni nadie. Einstein, Podolsky y Rosen dieron por sentado en su trabajo que la aparente no-localidad de la mecánica cuántica debía ser sólo aparente, que tenía que haber algún tipo de anomalía matemática o de desajuste en la notación; o, en todo caso, que se trataría de un artefacto del algoritmo. Creían que las predicciones de la mecánica cuántica para los experimentos se podrían deducir sin necesidad de pasos no-locales.

Razonaron como sigue: si, de acuerdo con lo admitido, no existía una verdadera no-localidad física en el mundo, y si las predicciones experimentales de la mecánica cuántica eran correctas, resulta obligado concluir que la mecánica cuántica tenía que estar dejando aspectos del mundo fuera de su alcance. Habría hechos del mundo que no describía.

Bohr respondió a EPR casi de inmediato. La réplica, febrilmente escrita, no afrontaba ninguno de los argumentos científicos concretos del artículo, sino que cuestionaba —de manera opaca, a veces hasta con oscuridad de oráculo— el uso que hacía de la palabra “realidad” y la definición que daba de “elementos de la realidad física”. Bohr se explayaba acerca de la distinción entre sujeto y objeto, sobre las condiciones en las que tiene sentido hacer preguntas y sobre la naturaleza del lenguaje humano. Lo que la ciencia necesitaba, según Bohr, era una “revisión radical de nuestra actitud con respecto a la realidad física”.

Bohr coincidía con EPR en un punto: no había una verdadera no-localidad física. La aparente no-localidad, sostenía, era sólo una razón más por la que debíamos abandonar la pintoresca y anticuada aspiración, manifiesta en el artículo de EPR, de buscar en las ecuaciones de la mecánica cuántica una imagen realista del mundo, una imagen de lo que realmente existe ante nosotros a cada momento. Bohr venía a defender, no ya que al mundo lo veamos en un espejo imperfecto, sino que no hay más realidad que esa veladura.

Resulta curioso que Bohr respondiese de manera tan filosófica a una intervención explícitamente científica. Más curiosa aún fue la consagración de la respuesta de Bohr como evangelio oficial de la física teórica, tras la cual gastar más tiempo en estos temas equivalía a apostatar. La física se apartó así de sus antiguas aspiraciones a descubrir qué es el mundo realmente; durante mucho tiempo relegó las cuestiones metafísicas a la literatura fantástica.

Los autores

David Z Albert y **Rivka Galchen** enseñan en la Universidad de Columbia. Albert es profesor E. Frederick Woodbridge de filosofía en Columbia y autor de *Quantum Mechanics and Experience* y de *Time and Chance*. Galchen es profesora asistente adjunta de escritura de la Escuela de Artes de Columbia.



1831: Michael Faraday introduce la idea de líneas de fuerza magnéticas. Desde entonces, se utiliza una notación basada en campos eléctricos y magnéticos que llenan el espacio. Las fuerzas sobre una partícula se convierten, al menos formalmente, en una acción local de los campos sobre ella. Sin embargo, estos campos se consideran convenientes herramientas de cálculo, no genuinas entidades reales.

1849: Hippolyte Fizeau y Jean-Bernard Foucault midieron la velocidad de la luz —298.000 kilómetros por segundo—, pero no se sabía qué era realmente la luz.



1865: las ecuaciones de James Clerk Maxwell ponen de manifiesto que los campos electromagnéticos tienen por sí mismos una existencia dinámica y cruzan el espacio vacío a 298.000 km/s. El electromagnetismo es local y la luz es una onda electromagnética.

$$\nabla \times E = -\frac{1}{c}\frac{dB}{dt}$$
$$\nabla \times B = \frac{\mu}{c}\left(4\pi i + \frac{dD}{dt}\right)$$
$$\nabla \cdot D = 4\pi\rho$$
$$\nabla \cdot B = 0$$

CORDELIA MOLLOY *Photo Researchers, Inc. (repulsión magnética de Faraday)*; LAWRENCE MANNING *Corbis (velocidad de la luz de Fizeau y Foucault)*; SPL/PHOTO RESEARCHERS, INC. *(ecuaciones de Maxwell)*

El teorema de Bell y el mundo físico

La no-localidad de nuestro mundo físico se desprende de la combinación de un teorema demostrado por John S. Bell en 1964 y los ulteriores resultados experimentales obtenidos desde principios delos años ochenta. El teorema se basa en el problema relativo a las partículas entrelazadas señalado por Einstein, Podolsky y Rosen (EPR) en 1935 (*véase el recuadro* "El experimento mental de EPR"). El argumento de EPR supone que la naturaleza es local, de manera que una determinada medición (por, digamos, Alicia), que se efectúe con una de las partículas componentes de un par de partículas entrelazadas y muy distantes entre sí, no modificará instantáneamente el estado físico de la partícula asociada lejana (que, digamos, mide Benito). Llegan a la conclusión de que la partícula de Benito ya debe tener unos valores determinados de su espín en todas las direcciones. Por lo tanto, la mecánica cuántica debe ser incompleta, pues no determina dichos valores, sino que se limita a garantizar que los resultados de las mediciones de Benito estarán correlacionados con los que obtenga Alicia al medir su partícula.

Bell se preguntó: suponiendo que las partículas entrelazadas de Alicia y Benito tengan valores determinados del espín, ¿reproducirían los resultados predichos por la mecánica cuántica en todas y cada una de las maneras en que Alicia y Benito podrían medir sus partículas? Recordemos que, con partículas con espines entrelazados, Alicia y Benito deben elegir un eje, Alicia el suyo y Benito el suyo, respecto al que medir. Bell demostró matemáticamente que, si Alicia y Benito eligen medir a lo largo de ejes que formen un ángulo de entre 45 y 90 grados, sus mediciones en numerosas repeticiones del experimento producirán una distribución estadística de resultados que no concordaría con las predicciones de la mecánica cuántica, independientemente de la distribución de valores determinados del espín que tuvieran esas partículas.

Se llevaron a cabo experimentos con fotones entrelazados, no con electrones (lo que altera los ángulos a utilizar, pero hace que el experimento sea técnicamente mucho menos difícil); los resultados se ajustaron a las predicciones de la mecánica cuántica. Por el teorema de Bell, no debe haber ningún valor determinado para dichos fotones. Y debido a que esto contradice la conclusión de EPR, la hipótesis de que la naturaleza es local queda también refutada: el universo en que vivimos no puede ser local.

Se sigue postergando esta parte crucial del legado de Einstein incluso hoy en día. La biografía de Einstein que Walter Isaacson publicó y vendió muy bien en 2007 se limita a asegurarle al lector que la crítica de Einstein a la mecánica cuántica ha sido resuelta desde entonces. Y eso no es cierto.

Retorno de lo reprimido

Pasaron treinta años de más o menos completo abandono antes de que el argumento de EPR se abordase científicamente, en un famoso artículo que John S. Bell publicó en 1964. Ponía de manifiesto que Bohr y Einstein se equivocaron: Bohr, al creer que nada fallaba en su manera de entender la mecánica cuántica; Einstein, en *qué* fallaba. Para comprender dónde estaba el error había que abandonar antes el principio de localidad.

La cuestión crucial estribaba en determinar si las violaciones del principio de localidad en el algoritmo mecanocuántico eran sólo aparentes o no. Bell parece haber sido el primero en preguntarse por el significado de esta cuestión. ¿Qué podría diferenciar de las infracciones aparentes del principio de localidad las verdaderas infracciones? Si existiese, razonó, algún algoritmo manifiesta y completamente local que hiciera las mismas predicciones para los resultados de los experimentos que el algoritmo cuántico, Einstein y Bohr habrían tenido razón en considerar las violaciones de la localidad, por la mecánica cuántica, un mero artefacto de un formalismo determinado. Por el contrario, si ningún algoritmo pudiera evitarlas, serían fenómenos físicos genuinos. Bell analizó un caso concreto de entrelazamiento y llegó a la conclusión de que ningún algoritmo de la especie requerida podía ser local.

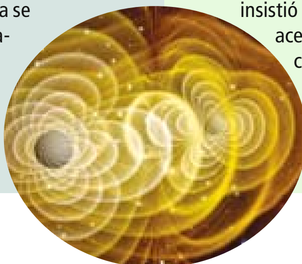
En consecuencia, el mundo físico real no es local.

Esta conclusión lo vuelve todo del revés. Einstein y Bohr, igual que los demás sin excepción, habían dado por sentado que cualquier verdadera incompatibilidad entre la mecánica cuántica y el principio de localidad sería una mala noticia para la mecánica cuántica. Sin embargo, Bell había ahora demostrado que la localidad no sólo era incompatible con el aparato teórico abstracto de la mecánica cuántica, sino también con algunas de sus predicciones empíricas. Los experimentadores, en particular Alain Aspect y su equipo, del Instituto de Optica en Palaiseau, en 1981 y después, no han dejado ninguna duda de que dichas predicciones son correctas. Las malas noticias, pues, no afectaban a la mecánica cuántica, sino al principio de localidad y, cabía presumir, a la relatividad especial, ya que ésta parece basarse en ese mismo principio (*véase el recuadro* "Relatividad especial y no-localidad").



1905: la teoría de la relatividad especial de Einstein reconcilia las ecuaciones de Maxwell con el principio de que los observadores que se desplazan entre sí a una velocidad relativa constante deberían ver idénticas leyes de la física. Sin embargo, destruye la posibilidad de que sucesos distantes sean simultáneos en un sentido absoluto.

1915: En la teoría de la relatividad general de Einstein, la curvatura del espaciotiempo desempeña el papel que cumplen los campos electromagnéticos para las fuerzas electromagnéticas. La gravedad es local: si una masa se agita, habrá ondulaciones de la curvatura que se propagarán a la velocidad de la luz.



1935: Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen (EPR) argumentaron que, debido a que los cálculos de la mecánica cuántica incluyen pasos no-locales, ésta es una teoría incompleta. Niels Bohr (*en el extremo derecho*) insistió en que debemos aceptar la mecánica cuántica y, en cambio, abandonar viejas nociones de "realidad".



HULTON-DEUTSCH (*Einstein*); C. HENZE/NASA (*curvatura del espaciotiempo*); PAUL EHRENFEST, CORTESIA DE EMILIO SEGRE VISUAL ARCHIVES, EHRENFEST COLLECTION (*Einstein y Bohrs*)

Cuestiones metafísicas

El trabajo de Bell fue recibido con renovada ofuscación, ceguera que incluso hoy en día persiste en muchos sectores. Bell había demostrado que cualquier teoría que reprodujese las predicciones empíricas de la mecánica cuántica para parejas de partículas entrelazadas tenía que ser —y debía serlo la propia mecánica cuántica— verdaderamente no-local desde el punto de vista físico.

Este mensaje ha sido ignorado casi siempre. Es opinión común que Bell demostró que cualquier intento de sustituir la imagen del mundo ortodoxa de la mecánica cuántica con algo más acorde con nuestras expectativas metafísicas clásicas —cualquier teoría determinista o filosóficamente realista, de las llamadas de variables ocultas— tendría que ser no-local para reproducir las predicciones que la mecánica cuántica hace para los sistemas considerados por EPR (en el recuadro "Otras salidas" se habla de un par de propuestas que escapan de las premisas de Bell). El artículo de Bell, al fin, se leyó, pero reflejado en un espejo convexo.

Sólo una exigua minoría de físicos escapó de este malentendido y comprendió que la demostración de Bell y los experimentos de Aspect significaban que se había descubierto que el mundo era no-local; pero incluso estos físicos, o casi todos ellos, creían que la no-localidad en cuestión no planteaba ninguna amenaza contra la relatividad especial. Esta creencia surge de la idea de que la relatividad especial se encuentra inextricablemente ligada a la imposibilidad de transmitir mensajes a mayor velocidad que la de la luz. Si la relatividad especial es cierta, no se podrá acelerar ningún portador material de un mensaje desde su estado de reposo hasta velocidades superiores a la de la luz. Y se puede argumentar que un mensaje cuya transmisión fuese más rápida que la luz llegaría, según algunos relojes, antes de haber sido enviado, desencadenándose así todas las paradojas de los viajes en el tiempo.

En 1932, John von Neumann demostró que la no-localidad de la mecánica cuántica no puede nunca dar pie a un mecanismo que transmita mensajes instantáneamente. Durante muchos decenios, casi toda la comunidad de la física teórica consideró la demostración de Von Neumann como una garantía de que la no-localidad de la mecánica cuántica y la relatividad especial coexistían de manera pacífica.

Variedades de la experiencia no-local

Transcurrirían otros 30 años de la publicación del trabajo de Bell antes de que se plantearan estas cuestiones abiertamente. La primera discusión clara, razonada, lógicamente impecable y de una franqueza sin concesiones de la no-localidad cuántica y la relatividad apareció en 1994, en un libro que tiene precisamente por título esa conjunción, de Tim Maudlin, de la Universidad Rutgers (*Quantum Non-Locality and Relativity*). Se explicaba ahí que la compatibilidad de la no-localidad y la relatividad especial encerraba detalles mucho más sutiles que los considerados en los argumentos basados en los mensajes instantáneos.

El trabajo de Maudlin tenía el telón de fondo de un nuevo y profundo cambio en el ambiente intelectual. Desde comienzos de los años noventa en adelante, la fuerza de convicción de la idea de Bohr —que no podía haber una descripción, pasada de moda, filosóficamente realista, del mundo subatómico— estaba empezando a debilitarse en todas partes. Por entonces, una serie de prometedoras concepciones científicas parecían ofrecer una buena descripción del tipo negado por Bohr, al menos en la aproximación que no toma en cuenta los efectos de la relatividad especial. Entre esas propuestas se incluían la mecánica de David Bohm (desarrollada a principios de los años cincuenta y una de las inspiraciones del trabajo de Bell, pero ignorada en gran medida) y el modelo GRW de Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini y Tullio Weber [*véase* "Teoría alternativa de Bohm a la mecánica cuántica", por David Z Albert; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 1994]. La vieja aspiración de la física de ser una guía para la metafísica que nos diga, literalmente y

OTRAS SALIDAS

Algunos físicos sostienen que la demostración matemática de John S. Bell de la no-localidad del mundo cuántico tiene algunas vías de escape.

MUCHOS MUNDOS

Bell, inocentemente, da por supuesto que los experimentos cuánticos tienen resultados únicos. La interpretación de los muchos mundos, sin embargo, afirma que las medidas cuánticas desdoblan el universo en ramas en las que los diferentes resultados se producen en paralelo [*véase* "Los muchos mundos de Hugh Everett", por Peter Byrne; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2008]. Así, el universo puede ser "local" si copias del experimento habitan multitud de invisibles universos paralelos. Este enfoque, sin embargo, tropieza con muchos problemas.

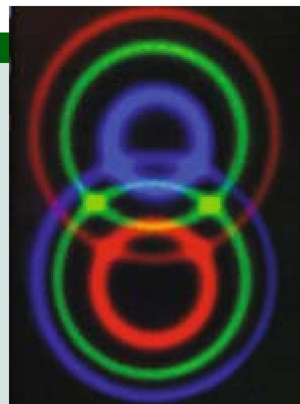
¿REALISMO?

Muchos creen que, debido a que en su prueba toma como premisa el "realismo local", Bell demostró que se viola *o bien* el principio de localidad *o bien* el realismo. Así pues, el mundo podría ser local si viola el "realismo". Sin embargo, esta idea pasa por alto —o entiende mal— que el argumento original de EPR descarta que la localidad cuántica sea posible sin el "realismo" que usa Bell.

1964: John S. Bell (*a la derecha*) extiende el razonamiento de EPR a la medición de espines a lo largo de ejes no paralelos. Demostró que ninguna teoría local puede reproducir todas las predicciones experimentales de la mecánica cuántica. Las predicciones de cualquier teoría local deben satisfacer unas relaciones matemáticas, las "desigualdades de Bell".



1981-presente: los experimentos con estados de luz entrelazados (*a la derecha*), en particular los de Alain Aspect y sus colaboradores, verifican que el mundo sigue las predicciones de la mecánica cuántica incluso en aquellas situaciones donde la mecánica cuántica viola las desigualdades de Bell. El mundo no respeta el principio de localidad.



CERN, CORTESIA DE AIP EMILIO SEGRE VISUAL ARCHIVES (*Bell*); PAUL KWIAT Y MICHAEL RECK *Universidad de Viena (entrelazamiento)*

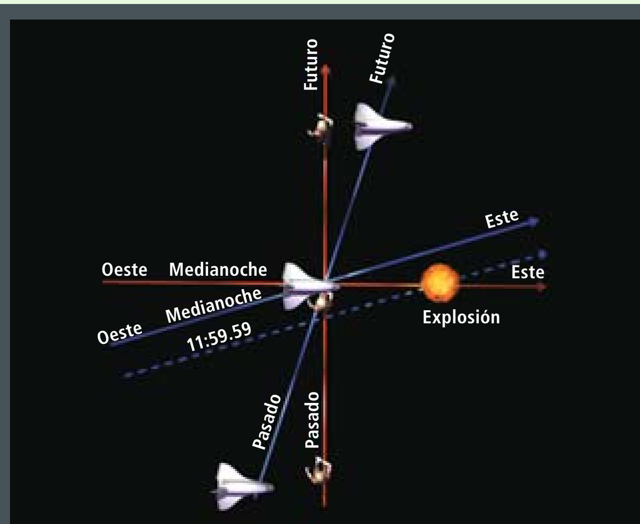
Relatividad especial y no-localidad

La teoría especial de la relatividad pone de manifiesto una relación geométrica esencial entre el espacio y el tiempo. Tal relación hace que el concepto de "acción instantánea a distancia" resulte, amén de extraño, ininteligible.

En este caso, Alicia y Benito no pueden estar de acuerdo acerca de qué sucesos remotos son simultáneos, ni pueden estar de acuerdo acerca de una teoría que implique la acción a distancia; por ejemplo, una en la que Alicia provoca una explosión lejana "instantáneamente" pulsando un botón a medianoche.



Alicia y Benito, que están en distintos lugares alrededor de una mesa, discrepan acerca de las direcciones espaciales "derecha", "izquierda", "adelante" y "hacia atrás". Según la relatividad especial, individuos en movimiento relativo entre sí discreparán acerca del tiempo y del espacio.



Los ejes del espacio y el tiempo de Alicia (*rojo*) se cortan allí donde se encuentra a medianoche. Benito vuela sobre Alicia en dirección este a casi la velocidad de la luz. Su movimiento inclina sus ejes de espacio y tiempo (*azul*) con respecto a los de Alicia. El dúo está en desacuerdo acerca de cuándo explotó una bomba a varios kilómetros: Alicia insiste en que sucedió a medianoche, pero Benito dice que ocurrió un segundo antes (*línea discontinua azul*).

de manera directa, cómo es el mundo en realidad —aspiraciones que habían permanecido latentes y olvidadas durante más de 50 años— empezaba, lentamente, a despertar.

El libro de Maudlin se centraba en tres puntos importantes. En primer lugar, la teoría especial de la relatividad es una aseveración acerca de la estructura geométrica del espacio y del tiempo. La imposibilidad de la transmisión de masa, o de energía, o de información, o de influencias causales, a mayor velocidad que la de la luz, no basta de por sí, ni aun remotamente, para garantizar que sea correcta esa aseveración de la teoría acerca de la geometría. Así pues, la demostración de Von Neumann sobre la transmisión de mensajes, de por sí, no nos ofrece ninguna garantía de que la no-localidad de la mecánica cuántica y la relatividad especial puedan coexistir pacíficamente.

En segundo lugar, la validez de la relatividad especial es perfectamente compatible con una enorme variedad de hipotéticos mecanismos para una transmisión de masa y energía, de información y de influencia causal más veloz que la luz. En los años sesenta, Gerald Feinberg, de la Universidad de Columbia, publicó una teoría plenamente relativista e internamente coherente de una hipotética partícula, los taquiones, para los que sería físicamente imposible viajar *más despacio* que la luz. Maudlin inventó otros ejemplos.

Por lo tanto, la mera existencia de una no-localidad en la mecánica cuántica no significa, por sí sola, que la mecánica cuántica no pueda coexistir con la relatividad especial. Podría, pues, haber esperanza.

Sin embargo, tal como Maudlin señaló en su tercer punto, la variedad de acción a distancia que encontramos en la mecánica cuántica es totalmente diferente de la clase ejemplificada por los taquiones de Feinberg o por otros ejemplos de Maudlin. Si la manera en que las partículas de la mecánica cuántica pueden influir no-localmente unas en otras resulta tan extraña, es porque no depende de la disposición espacial de las partículas, ni de sus características físicas intrínsecas, como sucede en todas las influencias relativistas a que se alude en los párrafos precedentes, sino que depende sólo de que las partículas en cuestión se hallen o no mecanocuánticamente entrelazadas.

El tipo de no-localidad que se encuentra en la mecánica cuántica parece demandar una simultaneidad absoluta, lo que supondría una verdadera amenaza contra la relatividad especial. Ese es el problema.

ALFRED T. KAMAJIAN

¿Esperanza para la relatividad especial?

Dos nuevos resultados —que, curiosamente, apuntan en direcciones diferentes— han surgido de este debate en los últimos años. El primero sugiere una forma en que la no-localidad de la mecánica cuántica podría ser compatible con la relatividad especial; el otro pone de manifiesto un nuevo golpe que la combinación de la mecánica cuántica y la relatividad especial lanza contra los fundamentos de nuestra visión intuitiva del mundo.

El primer resultado apareció en un sorprendente trabajo de 2006 de Roderich Tumulka, ahora en la Universidad Rutgers. Tumulka demostró que todas las predicciones empíricas de la mecánica cuántica para pares de partículas entrelazadas pueden reproducirse mediante una ingeniosa modificación de la teoría GRW (recuérdese que esta teoría propone una forma realista, en el sentido filosófico de la palabra, de obtener las predicciones de la mecánica cuántica en muchas circunstancias). La modificación es no-local y, sin embargo, resulta plenamente compatible con la geometría del espaciotiempo de la relatividad especial.

Se trata de una línea de investigación todavía en pañales. No se ha avanzado ninguna versión satisfactoria de la teoría de Tumulka que pueda aplicarse a partículas que se atraigan o repelan. Además, su teoría introduce una nueva variedad de no-localidad en las leyes de la naturaleza, una no-localidad no sólo en el espacio, sino también en el tiempo. Para determinar con su teoría las probabilidades de lo que ocurrirá después, no sólo hay que introducir el estado físico completo actual del mundo (como es habitual en las teorías físicas), sino también algunos datos del pasado. Esta característica, y no sólo ella, resulta preocupante.

En cualquier caso, Tumulka ha socavado algunos de los motivos por los que Maudlin temía que la no-localidad de la mecánica cuántica no pudiese coexistir pacíficamente con la relatividad especial.

El otro resultado reciente, descubierto por uno de los autores (Albert), muestra que la combinación de la mecánica cuántica y la relatividad especial exige renunciar a otra de nuestras convicciones primordiales. Creemos que todo lo que haya que decir sobre el mundo podría decirse, en principio, en forma de relato. O en términos más precisos y técnicos: todo lo que hay que decir se puede disponer en un conjunto infinito de proposiciones de la forma "en *t1 ésta* es la condición física exacta del mundo" y "en *t2 aquélla* es la condición física exacta del mundo", y así sucesivamente. Pero el fenómeno mecanocuántico del entrelazamiento y la geometría del espaciotiempo de la relatividad especial, combinados, implican que la historia física del mundo es demasiado rica, y en un grado infinito, para eso.

El problema es que la relatividad especial tiende a mezclar el espacio y el tiempo de una manera que transforma el entrelazamiento cuántico entre sistemas físicos distintos en un entrelazamiento entre situaciones físicas en momentos diferentes, algo que, de forma perfectamente concreta, supera o elude la suma de las situaciones en distintos instantes temporales, o no tiene nada que ver con ellas.

Este resultado, como la mayoría de los resultados teóricos de la mecánica cuántica, implica la manipulación y el análisis de una entidad matemática, la función de onda. Erwin Schrödinger la introdujo hace más de ochenta años para definir los estados cuánticos. A partir de las funciones de onda se infiere la posibilidad (de hecho, la necesidad) del entrelazamiento y la indefinición de las posiciones de las partículas, entre otras peculiaridades cuánticas. En el meollo de los problemas derivados de los efectos no-locales de la mecánica cuántica se encuentra la función de onda.

Pero una función de onda, ¿qué es exactamente? Los investigadores de los fundamentos de la física han convertido la cuestión en centro de debate. ¿Es un objeto físico concreto? ¿Se trata acaso de una especie de ley del movimiento? ¿Constituye quizás una propiedad interna de las partículas, o una relación entre puntos espaciales? ¿O es simplemente nuestra información actual acerca de las partículas? ¿O *qué*?

Las funciones de onda de la mecánica cuántica sólo pueden representarse matemáticamente por medio de un espacio de muchas dimensiones, el espacio de configuración. Si, como algunos aducen, las funciones de onda deben ser consideradas objetos físicos concretos, tendremos que tomar en serio la idea de que la historia del mundo transcurre, no en el espacio tridimensional de nuestra experiencia diaria, ni en el tetradimensional de la relatividad especial, sino en un gigantesco espacio de configuración del que se desprende la ilusión de la tridimensionalidad. Nuestra idea tridimensional de la localidad debería también entenderse como emergente. La no-localidad de la física cuántica podría ser nuestra ventana a ese nivel más profundo de realidad.

La valoración de la relatividad especial se ha convertido de repente, poco más de un siglo después de que fuese presentada al mundo, en una cuestión abierta y en rápido desarrollo. Se ha llegado a esta situación porque los físicos y los filósofos han seguido los cabos sueltos del argumento de Einstein, tanto tiempo descuidado, sobre la mecánica cuántica, una prueba más, cargada de ironía, del genio de Einstein.

Bibliografía complementaria

QUANTUM THEORY AND MEASUREMENT. Dirigido por John Archibald Wheeler y Wojciech Hubert Zurek. Princeton University Press, 1983. (Incluye el trabajo original de EPR y la respuesta de Niels Bohr.)

QUANTUM MECHANICS AND EXPERIENCE. David Z Albert. Harvard University Press, 1992.

THE SHAKY GAME: EINSTEIN, REALISM, AND THE QUANTUM THEORY. Segunda edición. Arthur Fine. University of Chicago Press, 1996.

QUANTUM NON-LOCALITY AND RELATIVITY: METAPHYSICAL INTIMATIONS OF MODERN PHYSICS. Segunda edición. Tim Maudlin. Wiley-Blackwell, 2002.

SPEAKABLE AND UNSPEAKABLE IN QUANTUM MECHANICS: COLLECTED PAPERS ON QUANTUM PHILOSOPHY. Segunda edición. J. S. Bell. Cambridge University Press, 2004. Traducción al español: LO DECIBLE Y LO INDECIBLE EN MECANICA CUANTICA. Recopilación de artículos sobre filosofía cuántica. John S. Bell. Alianza Editorial; Madrid, 1990.

Nanorradios

ED REGIS

Un solo nanotubo de carbono realiza todas las funciones básicas de un receptor de radio. De ese modo, puede captar y reproducir una canción cualquiera

La nanotecnia quizá sea la "maravilla venidera" más sobrevalorada en la historia reciente de la ciencia aplicada. Para sus defensores más radicales, se trata de un sistema de fabricación molecular que nos permitirá crear, molécula a molécula, por medios mecánicos, objetos de complejidad casi ilimitada cuyos átomos, todos, se encontrarán finalmente ordenados como se quiera.

La realidad no es hoy tan espléndida. El prefijo "nano" se ha generalizado tanto, que ahora se aplica a cualquier cosa muy pequeña. Se habla de "nanopartículas" en artículos tan diversos como gasolinas, protectores solares, lápices de labios y ceras para esquís. ¿Quién iba a pensar que uno de los primeros dispositivos de dimensión nanométrica realmente funcionales, es decir, con efectos perceptibles en el mundo macroscópico, sería una radio? La radio de nanotubo, inventada en 2007 por el físico Alex Zettl y sus colaboradores de la Universidad de California en Berkeley, logra resultados asombrosos: un solo nanotubo de carbono se sintoniza a una señal de radio, la amplifica, la convierte en señal de audiofrecuencia y la envía a un altavoz externo en una forma fácilmente reconocible por el oído humano.

Según sus fabricantes, la radio de nanotubo podría ser la base de una serie de aplicaciones revolucionarias: audífonos, teléfonos móviles e iPods acoplables en el pabellón auricular. Zettl asegura que una nanorradio se alojaría sin dificultad en el interior de una célula, de suerte tal que ésta tuviera acceso a funciones cerebrales o musculares e, incluso, a dispositivos controlados por radio que circulasen por el torrente sanguíneo.

La voz del nanotubo

Zettl, director de un grupo de 30 investigadores dedicados a crear dispositivos de tamaño molecular, decidió concentrarse en los nanotubos, en atención a la peculiaridad de su estructura. Se discute quién los descubrió, pero su introducción en el campo científico suele atribuirse al físico japonés Sumio Iijima, que en 1991 anunció el hallazgo de unos "tubos aciculares" de carbono en la extremidad de un electrodo de grafito que emitían una descarga en arco luminosa.

Esos nanotubos mostraban unas propiedades sorprendentes. Había gran variedad de tamaños y formas: con una, dos o múltiples capas; rectos, curvos e incluso toroidales. Todos compartían una excepcional resistencia a la tracción; es decir, a fraccionarse por la acción de fuerzas longitudinales. Una propiedad tan poco usual se debe, según Zettl, a la fuerte vinculación entre los átomos de carbono, el enlace más sólido que existe en la naturaleza. Los nanotubos son también excelentes conductores de la electricidad, mucho mejores que el cobre, la plata o incluso los superconductores.

Zettl concibió la idea de una nanorradio cuando se disponía a crear una red de minúsculos sensores capaces de comunicarse entre sí y de difundir sus observaciones por medios inalámbricos. Distribuidos por las proximidades de una factoría o refinería,

CONCEPTOS BASICOS

- Durante muchos años, la nanotecnia ha tenido más de ficción que de realidad; la etiqueta "nano" se ha aplicado lo mismo a la gasolina que a los lápices de labios.
- Una de las primeras máquinas de tamaño nanométrico es un radiorreceptor capaz de reproducir canciones.
- En este dispositivo, un solo nanotubo realiza las funciones que en las radios ordinarias requieren varios componentes. El aparato nanométrico puede al fin encontrar aplicación en sistemas de administración de fármacos, en prótesis o en detectores de explosivos.

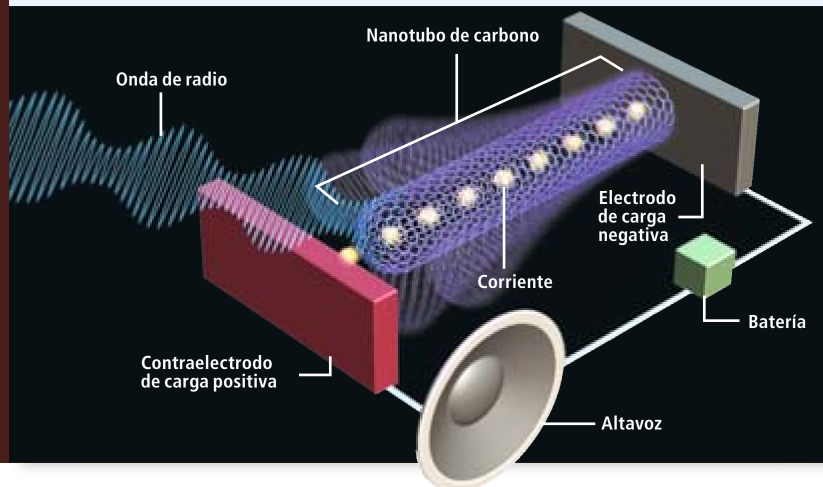
SHELTER PRODUCTIONS (*fotografía*); KURSTEN BRACCHI (*estilo*); ANTHONY ISAMBERT DE HALLEY RESOURCES (*preparativos*)



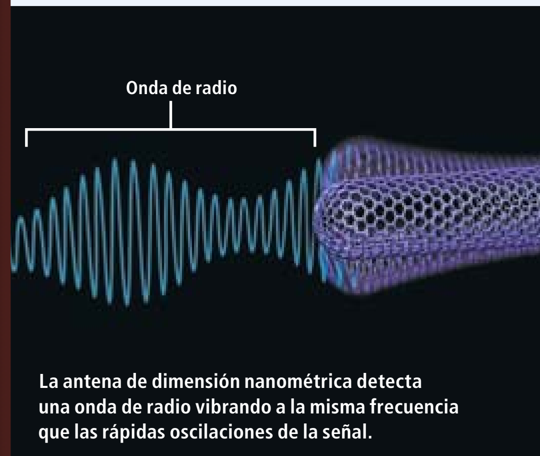
Anatomía de la radio más diminuta

Basta un nanotubo para realizar todas las funciones ejecutadas en una radio normal por numerosos componentes. Sus minúsculas dimensiones le permiten vibrar con rapidez en presencia de una señal radioeléctrica. Esta nanoantena, conectada a un circuito eléctrico, sintoniza, amplifica y separa la componente de audio del resto de la onda radioeléctrica.

RADIO DE NANOTUBO



RECEPCION



La antena de dimensión nanométrica detecta una onda de radio vibrando a la misma frecuencia que las rápidas oscilaciones de la señal.

GEORGE RETSECK

transmitirían sus resultados a un punto colector central: se podría leer así en tiempo real, a través de Google, por ejemplo, la calidad del aire de una ciudad. Durante las pruebas orientadas a producir un nanotubo sensor de masa, Kenneth Jensen, doctorando de Zettl, descubrió que, si se fijaba un nanotubo por un extremo a una superficie, como si fuera un voladizo, vibraría cuando se depositase una molécula sobre el cabo libre. Moléculas de diferentes masas harían vibrar el voladizo a distintas frecuencias. Zettl advirtió que algunas de esas frecuencias incluían las de la banda de radiodifusión comercial: a partir de entonces se propuso construir una radio basada en el nanotubo saledizo.

Básicamente, un radiorreceptor consta de cuatro partes: la antena, que capta la señal electromagnética; el sintonizador, que selecciona la frecuencia deseada dentro de la banda de radiodifusión; el amplificador, que aumenta la intensidad de la señal recibida; y un demodulador, que separa de la onda portadora la señal con la información. La señal que contiene información se envía luego a un altavoz externo, que la convierte en tonos audibles.

El nanotubo de carbono, elemento esencial del dispositivo, demostró poseer una combinación de propiedades químicas, geométricas y eléctricas tan sumamente favorables que, colocado entre un par de electrodos, realizaba por sí solo las cuatro funciones al mismo tiempo. No hacía falta ninguna pieza más.

Zettl y Jensen bosquejaron las líneas generales del proyecto. Se trataría de un nanotubo multicapa de carbono, construido sobre la punta de un electrodo, algo así como una bandera plantada en la cima de una montaña. Optaron por el tubo multicapa porque era un poco mayor y más fácil de montar sobre la superficie del electrodo; más tarde, sin embargo, construyeron también una versión con tubo monocapa. El tubo tendría unos 500 nanómetros de longitud y 10 nanómetros de diámetro —se asemejaba en tamaño y forma a algunos virus—, y se implantaría sobre el electrodo por manipulación nanométrica, o bien se haría que creciese directamente mediante depósito químico en fase de vapor, que precipita capas de carbono a partir de un gas ionizado.

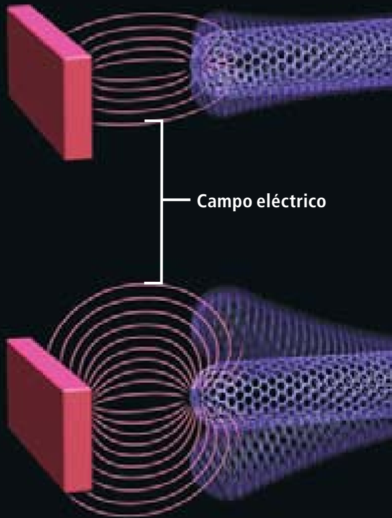
A cierta distancia de la extremidad, redondeada como una buckybola hemisférica —una buckybola es una estructura molecular poliédrica formada por decenas de átomos de carbono—, habría un contraelectrodo. Una pequeña tensión en corriente continua (CC) aplicada entre ambos electrodos crearía un flujo de electrones desde el extremo del nanotubo hasta el contraelectrodo. Con ello se pretendía que las ondas de una transmisión radioeléctrica del exterior incidieran en el nanotubo y lo hiciesen vibrar físicamente en sintonía con las variaciones de la señal electromagnética. Al vibrar en resonancia con las ondas de radio recibidas, el nanotubo se comportaría como una antena, aunque de funcionamiento muy distinto del propio de un receptor corriente.

En una radio normal, la antena capta las señales entrantes por medios electrónicos: inducen una corriente eléctrica en el cuerpo de la

El autor

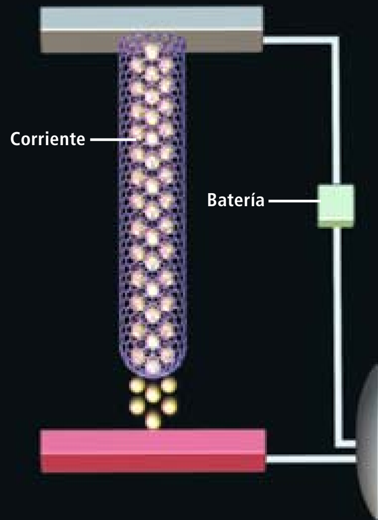
Ed Regis ha escrito siete obras científicas, entre ellas la reciente *What Is Life?: Investigating the Nature of Life in the Age of Synthetic Biology*, que trata sobre el intento de construir una célula viva artificial.

SINTONIZACION



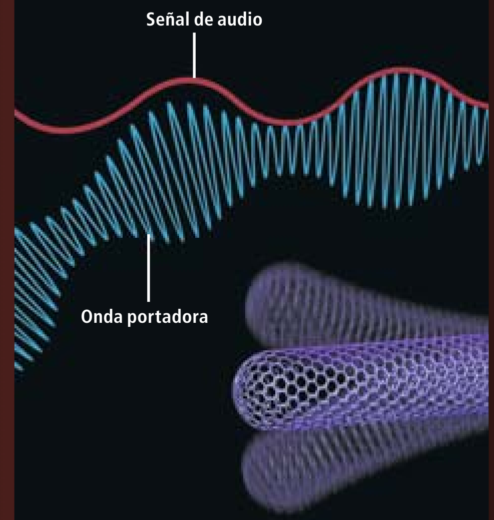
Es posible ajustar la intensidad del campo eléctrico para tensar el nanotubo como si fuera una cuerda de guitarra, para que vibre a la frecuencia correcta.

AMPLIFICACION



La señal se amplifica al emitir la extremidad del nanotubo un gran flujo de electrones en presencia de la pequeña tensión eléctrica que suministra la batería.

DEMODULACION



El nanotubo vibrante altera la corriente de modo que retenga sólo las audiofrecuencias que modulan la onda radioeléctrica portadora.

antena, que se mantiene en posición fija. En la nanorradio, por el contrario, es tan delgado y ligero el nanotubo, que las ondas electromagnéticas tienen fuerza suficiente para desviarlo mecánicamente a uno y otro lado.

"El mundo nanométrico es extraño; lo dominan diferentes agentes", señala Zettl. "La gravedad no desempeña factor alguno, y la inercia prácticamente no actúa; las cosas son tan diminutas, que los campos eléctricos residuales pueden llegar a predominar."

Las vibraciones del nanotubo inducirían, a su vez, un cambio en la corriente que fluye desde el extremo del nanotubo al contraelectrodo: en términos técnicos, una corriente de emisión por campo eléctrico. Se trata de un fenómeno de mecánica cuántica por el cual la aplicación de una pequeña tensión eléctrica provoca una gran emisión de electrones desde la superficie de un objeto: la punta de una aguja, por ejemplo. Dado el comportamiento de este tipo de emisión, era de esperar que el nanotubo no sólo sirviera de antena, sino también de amplificador. La onda electromagnética de escasa amplitud que incide en el nanotubo produciría la emisión de un amplio haz de electrones desde su vibrante extremo en libertad, emisión que amplificaría la señal entrante.

A continuación vendría la demodulación, el proceso por el que la frecuencia de la onda portadora de una estación radioeléctrica se separa de la información —voz o música— que va codificada sobre aquella onda. En una emisión de radiodifusión modulada en amplitud (AM), la separación se consigue por medio de un circuito de rectificación y filtrado que responde a la amplitud y desecha (filtra) la frecuencia de la onda portadora.

El grupo de Zettl dedujo que la radio de nanotubo podría desempeñar las mismas funciones: cuando un nanotubo vibra mecánicamente en sintonía con la frecuencia de la portadora, responde también a la onda de información codificada que la está modulando. Afortunadamente, la rectificación es un atributo inherente a la emisión por campo eléctrico: es decir, la corriente que sale del nanotubo varía sólo con la onda de información codificada o modulada, y la onda portadora ya no interviene. La demodulación viene a ser un regalo; no requiere un circuito separado.

En resumen, el nanotubo, comportándose como antena, vibraría al recibir una señal electromagnética en la frecuencia correcta. Su extremo vibrante amplificaría la señal, y la propiedad rectificadora inherente a la emisión por campo eléctrico separaría (demodularía) la onda portadora de la que contiene información. El contraelectrodo detectaría entonces las variaciones en la corriente de emisión por campo y transmitiría la información de audiofrecuencia a un altavoz, que la convertiría en ondas sonoras.

El experimento

En todo caso, ésta era la teoría. En enero de 2007, Zettl, Jensen y otros dos investigadores de Berkeley, Jeff Weldon y Henry Garcia, la pusieron en práctica. Montaron un nanotubo multicapa de carbono sobre un electrodo de silicio y situaron un contraelec-

El elemento activo de la radio tendría el tamaño y la forma de ciertos virus.

RADIOS MENGUANTES



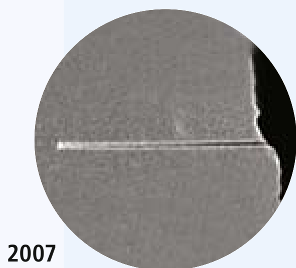
1931



1954



2003



2007

Las ondas de radio son invisibles, y los aparatos de radio se están achicando hasta casi serlo: desde una caja grande hasta un nanotubo acicular vibrante, solamente observable a través de un microscopio de muy alta resolución.

trodo, aproximadamente a un micrometro de su extremo. Conectaron por hilo conductor ambos electrodos. Insertaron, además, una batería de corriente continua para crear una pequeña corriente de emisión por campo eléctrico entre el extremo del nanotubo y el contraelectrodo. Con el fin de ver qué sucedía durante una emisión de radio, efectuada desde una antena próxima, colocaron el dispositivo entero dentro de un microscopio electrónico de transmisión de alta resolución. Empezaron a emitir.

Según la repetida anécdota, el primer mensaje transmitido por teléfono fue una petición de Alexander Graham Bell a su ayudante en 1876: "Mr. Watson, come here. I want to see you" (Sr. Watson, venga acá. Quiero verle). La primera transmisión inalámbrica realizada por Guglielmo Marconi en 1894 hizo sonar una campana a 10 metros de distancia. Y en enero de 2007 la radio de nanotubo de carbono concebida por Zettl recibía Layla, la canción de Eric Clapton.

Con el microscopio de transmisión, Zettl y su grupo vieron vibrar el nanotubo al mismo tiempo que lo oían sonar. "¡Nunca creí", dice, "que pudiera *ver* funcionar un aparato de radio!".

Y el lector puede verlo también, pues los experimentadores documentaron el proceso entero en audio y en vídeo. La película, en formato QuickTime, se encuentra en la página Web del grupo de investigación de Zettl; desde allí se puede descargarla y reproducirla gratuitamente. (En www.SciAm.com/nanoradio se puede oír Layla tal y como suena en la nanorradio.) Lo mismo hicieron después con "Good Vibrations", de los Beach Boys, con el tema principal de John Williams para *La Guerra de las galaxias* y con el Largo de *Jerjes*, de la opera de Haendel, que fue la primera pieza transmitida por radio.

Escuchar, y presenciar, la reproducción de estas piezas por la nanorradio es una experiencia muy singular. Al principio, se ve un nanotubo fijo, largo y delgado, sobre un fondo granuloso y monótono. El tubo se extiende horizontalmente desde una superficie irregular de aspecto rocoso, al lado de un nanotubo más corto que se mantendrá inalterado durante toda la conmoción electromagnética que sucede a su alrededor. (El nanotubo corto es insensible a la transmisión, porque su frecuencia de resonancia, dependiente de su longitud, no coincide con la frecuencia de la transmisión recibida.)

Al principio se oyen muchos ruidos estáticos, pero luego la aguja del nanotubo desaparece en una nube vibrante y la melodía empieza a destacar, reconocible pese a la debilidad del volumen sonoro, sobre el ruido de fondo, aunque no es más que la manifestación audible de un número finito de átomos que se mueven en sincronía con la música.

Poco después de este éxito inicial, los experimentadores sacaron el dispositivo del microscopio y modificaron ligeramente la configuración de radio, para que se pudieran transmitir y recibir señales a varios metros de distancia dentro del laboratorio. Se logró, además, sintonizar diferentes frecuencias en tiempo real, operación equivalente a "cambiar de emisora" mientras la radio funciona.

De dos maneras distintas puede sintonizarse una radio de nanotubo. Una es variando su longitud. Así como una cuerda de guitarra oprimida en diferentes trastes da tonos distintos, la frecuencia de resonancia de un nanotubo varía al acortarlo: vaporizando átomos de su extremo, por ejemplo.

Este cambio, sin embargo, es irreversible. Otra sintonización sería por variación de la intensidad del campo eléctrico que se aplica al nanotubo. Igual que varía el tono de una cuerda de guitarra según se le dé más o menos tensión, al modificar la intensidad del campo la nanorradio responderá a diferentes frecuencias de la banda radioeléctrica.

El dispositivo incorporaba, al mismo tiempo y con toda realidad, las cuatro funciones de un radiorreceptor. Era, a la vez, antena, amplificador, demodulador y sintonizador. El que una estructura tan pequeña y simple combinara todas esas funciones sigue asombrando a Zettl. ¿Cómo se explica esa convergencia casi mágica en una sola molécula alargada de carbono?

En electrónica es frecuente establecer compromisos: se optimiza algo a costa de ceder en otros aspectos. En este caso, sin embargo, todo parece ir a favor, y eso no es nada corriente. Según Zettl, se trata de una de las raras oportunidades en que la ley de Murphy no enseña su feo rostro; todo lo que puede salir bien, sale bien.

Zettl y su grupo callaron sobre su hallazgo durante varios meses, hasta que lo publicaron en *Nano Letters*, revista de la Sociedad Americana de Química. Su presentación formal en la Red fue en octubre de 2007; en noviembre, apareció la edición impresa. En ese mismo número, dos investigadores independientes, Chris Rutherglen y Peter Burke, ambos de la Universidad de California en Irving, anunciaban el uso de un nanotubo de carbono para demodular una señal de AM. Lo llamaron "radio de nanotubo de carbono", pero no incorporaba en sí todas las funciones, como el de Zettl: recurría a unidades ordinarias, de sobremesa, para realizar las funciones de

HEATHER GORDON (*radio de válvulas, radio de transistores y radio digital*); CORTESIA DEL GRUPO INVESTIGADOR ZETTL, LABORATORIO NACIONAL LAWRENCE BERKELEY Y UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA, BERKELEY (*nanorradio*)

Qué se puede hacer con una radio invisible

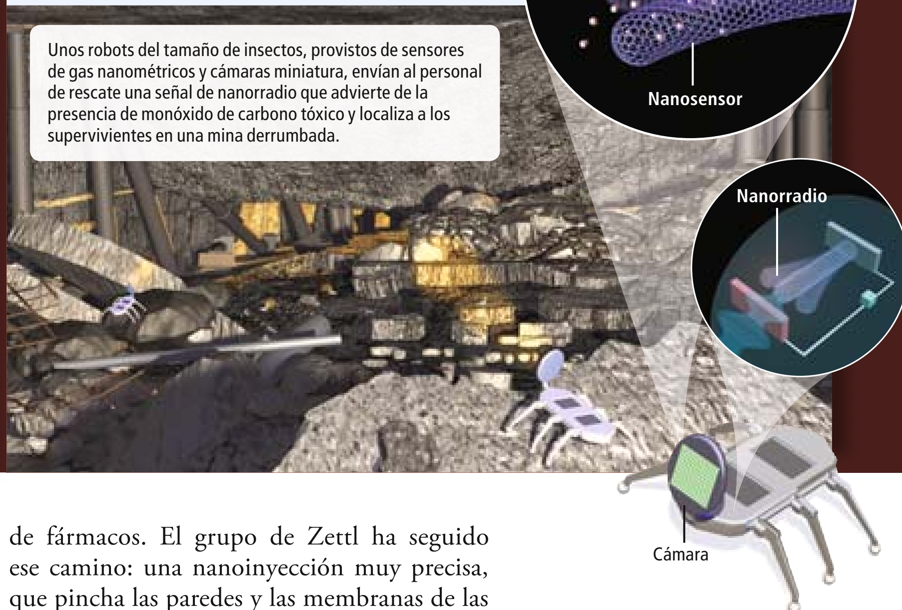
La nanorradio es mucho más que un seductor proyecto de fin de carrera. La capacidad de enviar y recibir señales desde un aparato microscópico permitirá desarrollar nuevos tipos de dispositivos para la administración de fármacos y robots que ayuden en las labores de rescate en una catástrofe.

ADMINISTRACION DE FARMACOS



Las cápsulas de fármaco equipadas con nanorradios se dirigen a las células cancerosas y desprenden allí su carga útil cuando reciben una señal procedente del exterior del cuerpo del paciente.

BUSQUEDA Y RESCATE



Unos robots del tamaño de insectos, provistos de sensores de gas nanométricos y cámaras miniatura, envían al personal de rescate una señal de nanorradio que advierte de la presencia de monóxido de carbono tóxico y localiza a los supervivientes en una mina derrumbada.

GEORGE RETSECK

antena y amplificación. Burke admite que la radio "todo en uno" de Zettl es una solución "muy elegante".

Medicación miniaturizada

En la radio de nanotubo, la nanotecnia deja de ser un conjunto de teorías, conjeturas y esperanzas, y deviene un instrumento que podría cambiar las cosas. Zettl no se abstiene de predecir que la nanorradio tendrá aplicaciones extraordinarias: toda una nueva generación de dispositivos de comunicación y de implantes cerebrales y musculares, por ejemplo. Si bien la realización de algunas de las aplicaciones más futuristas exigiría profundizar bastante en la investigación y la ingeniería, hay otras más a mano, como la administración de fármacos controlada por radio.

El uso de quimioterapia para reducir cánceres invisibles que se hayan extendido o tratar los que no admitan cirugía tiene una faceta negativa: los agentes químicos que destruyen las células cancerosas viajan por la sangre hacia todas las partes del cuerpo y a menudo matan también las células sanas. Algunos médicos le han sugerido a Zettl la siguiente solución: inyectar paquetes, dirigidos molecularmente contra las células cancerosas, que contengan un agente químico y una nanorradio, y darles tiempo para que lleguen a sus dianas tumorales; transcurrido ese lapso, unas señales controladas por radio provocarían la descarga del fármaco en las células cancerosas y las eliminarían.

Otra posible aplicación sería la reparación de células individuales mediante la inyección de fármacos. El grupo de Zettl ha seguido ese camino: una nanoinyección muy precisa, que pincha las paredes y las membranas de las células para introducir estructuras de nanotubos en su interior y liberar allí determinadas sustancias químicas.

Las células soportan muy bien esta técnica de nanoinyección, asegura Zettl, mucho mejor que el antiguo procedimiento de utilizar micropipetas para perforar las células e inyectar fluidos, demasiado burdo y dañino para la mayoría de las células. Zettl ha previsto una aplicación ulterior de su nanotubo sensor de masas original. Dado que algunos tipos de explosivos contienen moléculas identificadoras de masa conocida, un instrumento minúsculo que detecte esas moléculas con rapidez y fiabilidad podría reemplazar los imponentes espectrómetros de masas empleados para detectar explosivos en los puntos de control de los aeropuertos. Hasta ahora, nadie está comercializando ninguno de esos dispositivos. Zettl, sin embargo, ha patentado la nanorradio, el nanotubo sensor de masa y otras invenciones surgidas de su Centro de Sistemas Nanomecánicos Integrados, y ha empezado a conceder licencias para que otros las desarrollen.

Quizá no deba sorprendernos que algunos de los más recientes logros de Zettl en el mundo nanométrico hayan traspasado los límites de lo liliputiense. En julio de 2008, anunció en *Nature* que había conseguido imágenes en microscopio electrónico de átomos individuales de hidrógeno, el átomo más pequeño que existe en la naturaleza. Ya no cabe menguar más.

Bibliografía complementaria

NANOTUBE RADIO. Alex Zettl y col. en *Nano Letters*, vol. 7, n.º 11, págs. 3508-3511; 2007.

AN ATOMIC-RESOLUTION NANOMECHANICAL MASS SENSOR. Alex Zettl y col. en *Nature Nanotechnology*. Publicado en la Red el 20 de julio, 2008.



Salvar LAS NEURONAS NUEVAS

En el cerebro de un adulto se generan cada día neuronas nuevas. Estas células acaban participando en complejas tareas de aprendizaje. Cuanto más se las exige, con tanta mayor fuerza crecen

TRACEY J. SHORS

Si usted ve la televisión, lee revistas o navega por Internet probablemente habrá encontrado anuncios que le invitan a ejercitar la mente. Diversos programas de gimnasia mental animan a mantener la mente ágil mediante tareas diarias que van desde memorizar listas o resolver acertijos hasta hacer una estimación del número de árboles que hay en Central Park.

Aunque suene artificioso, esos programas pueden tener una base neurobiológica real. Investigaciones recientes, realizadas sobre todo en ratas, indican que el aprendizaje incrementa la tasa de supervivencia de las neuronas nuevas en el cerebro adulto. Y cuanto más difícil es el problema y mayor tiempo se dedica a su resolución, mayor es el número de neuronas que permanece. Se supone que estas neuronas quedan luego disponibles para colaborar en situaciones que requieren un esfuerzo mental notable. El ejercicio mental agudizaría el cerebro del mismo modo que el ejercicio físico mantiene el cuerpo en forma.

Estos descubrimientos resultan interesantes sobre todo para quienes no realizan ningún tipo de actividad intelectual, puesto que a su cerebro no le vendrían nada mal unas pocas "flexiones". Y lo que reviste mayor importancia, los resultados avalan la idea de que las personas que se encuentran en las etapas iniciales de la enfermedad de Alzheimer o que presentan otras formas de demencia podrían frenar su declive cognitivo mediante la actividad mental.

Neurogénesis

En el decenio de los noventa del siglo pasado, la neurobiología recibió la inesperada noticia de que el cerebro maduro de los mamíferos producía neuronas nuevas. Durante largo tiempo, los biólogos habían vivido convencidos de que la capacidad de neurogénesis estaba reservada para los cerebros jóvenes en desarrollo y que se perdía con la edad. Pero en la primera mitad de ese decenio, Elizabeth Gould, a la sazón en la Universidad Rockefeller, demostró que en el cerebro adulto se generaban células nuevas, concretamente en el hipocampo, una región implicada en el aprendizaje y la memoria. No tardaron en publicarse estudios semejantes realizados con diversas especies, desde ratones hasta monos tití.

En 1998, neurocientíficos de los EE.UU. y de Suecia demostrarían que la neurogénesis también tiene lugar en humanos [*véase* "Regeneración de las células nerviosas en adultos", por Gerd Kempermann y Fred H. Gage; Investigación y Ciencia, julio de 1999].

En roedores, los estudios de neurogénesis implican, por regla general, inyectar a los animales bromodesoxiuridina (BrdU), un fármaco que marca a las células recién formadas y permite distinguirlas cuando se las observa a través de un microscopio. Estos estudios indican que, en ratas, aparecen cada día en el hipocampo de 5000 a 10.000 neuronas nuevas. (Aunque en el hipocampo de los humanos surgen también neuronas nuevas, no se sabe cuántas.)

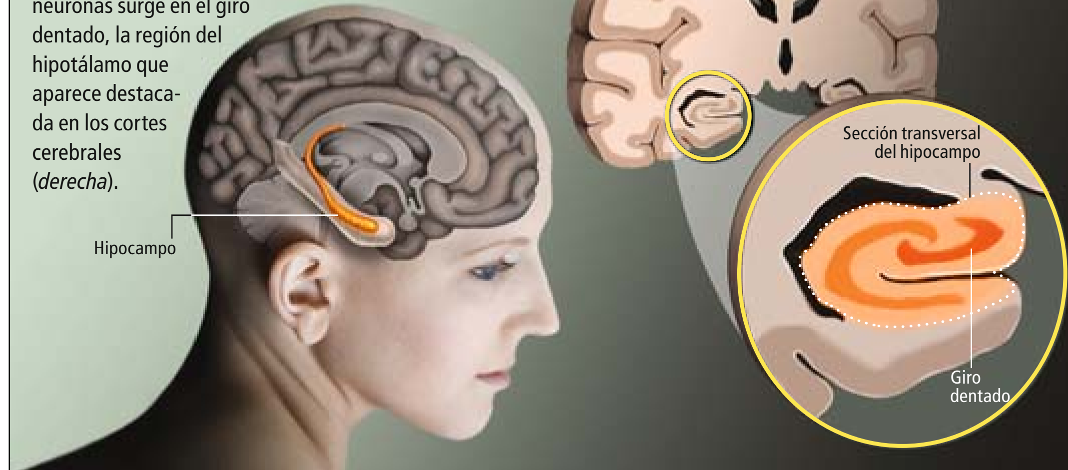
CONCEPTOS BASICOS

- Cada día se generan miles de células nuevas en el cerebro de un adulto, concretamente en el hipocampo, una estructura implicada en el aprendizaje y la memoria.
- Al cabo de un par de semanas, la mayoría de esas neuronas recientes morirán, a menos que el animal se enfrente al desafío de aprender algo nuevo. El aprendizaje, sobre todo el que requiere un esfuerzo notable, puede mantener con vida a esas neuronas nuevas.
- Aunque parece que las neuronas recientes no resultan necesarias para la mayoría de las modalidades de aprendizaje, pueden participar en la predicción del futuro a partir de experiencias pasadas. Por tanto, intensificar la neurogénesis podría ayudar a frenar el deterioro cognitivo y a mantener en forma un cerebro sano.

JANA LEON

FUENTE DE NEURONAS NUEVAS

En el cerebro de un adulto, las neuronas nuevas surgen en el hipocampo, una estructura implicada en el aprendizaje y la memoria. Aunque el fenómeno se descubrió en roedores, se han hallado también células cerebrales nuevas en humanos adultos. La nueva cosecha de neuronas surge en el giro dentado, la región del hipotálamo que aparece destacada en los cortes cerebrales (*derecha*).



Pero las células no se generan a un ritmo regular. La neurogénesis se ve afectada por diversos factores ambientales: el consumo de alcohol la retarda; el ejercicio físico la estimula. Las ratas y ratones que dedican tiempo a correr en la rueda de ejercicio desarrollan hasta el doble de células nuevas que los ratones sedentarios. La propia ingesta de arándanos parece impulsar la generación de nuevas neuronas en el hipocampo de los múridos.

O se usan o se pierden

El ejercicio físico y otras actividades pueden estimular la producción de células cerebrales adicionales. Pero estas nuevas incorporaciones no siempre permanecen. Muchas, si no la mayoría, desaparecen al cabo de pocas semanas. Cierto es que la mayoría de las células del organismo no sobrevive de forma indefinida; su muerte entra dentro de la normalidad. Lo que resulta desconcertante es su rápida desaparición. ¿Para qué se toma el cerebro la molestia de producir neuronas nuevas, si no tardarán en desaparecer?

Por lo que hemos investigado sobre ratas, la respuesta pudiera ser: "por si acaso". Si el animal se enfrenta a un desafío cognitivo, las células persistirán. En caso contrario, desaparecerán. Gould, hoy en la Universidad de Princeton, y la autora realizaron este descubrimiento en 1999, en el curso de una serie de experimentos para determinar el efecto del aprendizaje sobre la tasa de supervivencia de las neuronas recién formadas en el hipocampo del cerebro de ratas.

La tarea de aprendizaje que utilizamos, el "condicionamiento del parpadeo con pausa fija", guarda cierta semejanza con los experimentos de Pavlov con perros, que comenzaban a salivar cuando escuchaban un sonido que asociaban con la llegada de la comida. En el condicionamiento del parpadeo, un animal oye un sonido y después, al cabo de un período de tiempo establecido (unos 500 milisegundos, o medio segundo), recibe un soplo de aire o una leve estimulación del párpado, que le hace parpadear.

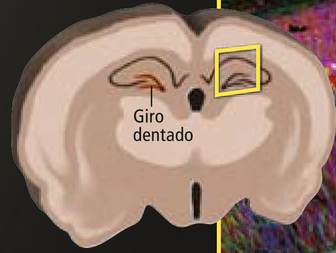
Tras cierto número de ensayos (varios cientos), el animal establece una conexión mental entre el sonido y la estimulación ocular: aprende a anticipar la llegada del estímulo y a parpadear antes. Esa respuesta "condicionada" indica que el animal ha aprendido a asociar temporalmente los dos sucesos. La hazaña de la rata puede parecernos elemental, pero el diseño experimental proporciona un buen método para medir en animales el "aprendizaje anticipatorio": la capacidad de predecir el futuro en razón de lo que ha sucedido en el pasado.

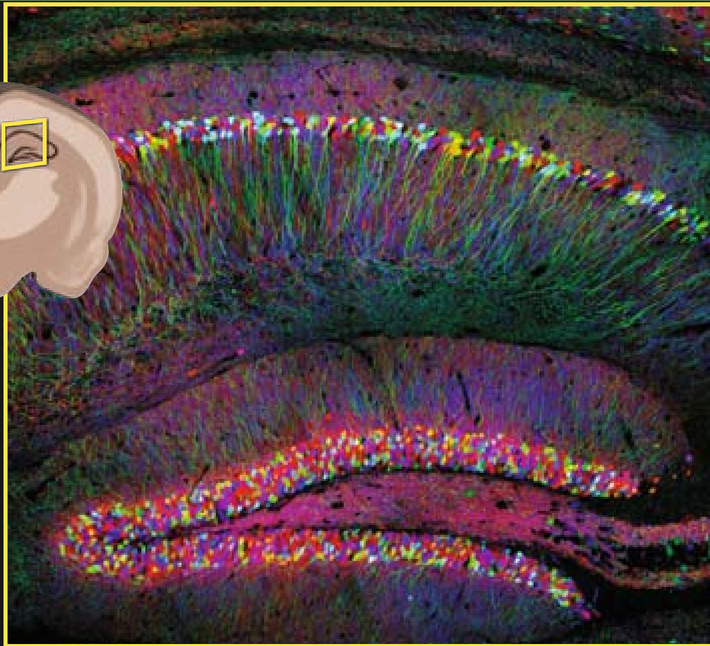
Para examinar la conexión entre aprendizaje y neurogénesis, al inicio de los experimentos se inyectó a todos los animales BrdU. Una semana después, la mitad de las ratas se incorporó al programa de entrenamiento para el parpadeo; el resto se quedó en la jaula. Tras cuatro o cinco días de entrenamiento, descubrimos que las ratas que habían aprendido a parpadear en el momento justo retenían en el hipocampo mayor número de neuronas marcadas con BrdU que los animales que habían

La autora

Tracey J. Shors, profesora del departamento de psicología y del Centro Cooperativo de Neurociencias en la Universidad Rutgers, investiga en neurobiología del aprendizaje y la memoria. En colaboración con Elizabeth Gould, de la Universidad de Princeton, una de las descubridoras de la neurogénesis en adultos, Shors demostró que el aprendizaje incrementaba la tasa de supervivencia de las neuronas nuevas del hipocampo y que esas neuronas recién incorporadas se hallaban implicadas en algunos aspectos del aprendizaje.

RUBBERBALL PRODUCTIONS *Getty Images (mujer)*; JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*)





La micrografía (*derecha*) muestra el hipocampo de un ratón "Brainbow", modificado genéticamente para que produzca en sus neuronas proteínas de diversos colores.

permanecido en su jaula. Extrajimos de ello la conclusión de que el aprendizaje del ejercicio había rescatado a células que, en otras condiciones, habrían muerto. En los animales que no recibieron entrenamiento, cuando terminó el experimento quedaban muy pocas células recién nacidas (marcadas con BrdU al inicio del experimento).

Cuanto más aprendía el animal, mayor era el número de neuronas nuevas retenidas. Lo mismo ocurría en animales que habían aprendido a desplazarse por un laberinto.

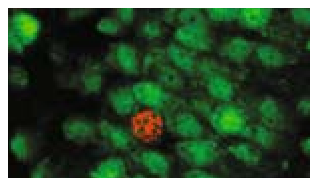
Cuando comenzamos los experimentos de parpadeo, a finales de los noventa, examinamos el efecto que había tenido el entrenamiento en los animales que habían aprendido la lección (los que habían aprendido a parpadear unos 50 milisegundos antes de la estimulación del párpado y que así lo hicieron en, al menos, el 60 por ciento de los ensayos). Posteriormente, nos preguntamos si los animales que fracasaron en el aprendizaje (o que no aprendieron lo suficiente) retenían también las neuronas nuevas tras el entrenamiento. La respuesta fue que no.

En estudios publicados en 2007, las ratas que participaron en alrededor de 800 ensayos y que nunca aprendieron a anticiparse a la estimulación del párpado tenían tan pocas neuronas nuevas como los animales que nunca abandonaron su jaula.

Acometimos otros experimentos de parpadeo con limitación de las oportunidades de aprendizaje: las ratas disponían de sólo un día (200 ensayos) para aprender. En esas condiciones, algunos animales aprendieron a anticipar el estímulo; otros no. De nuevo, las ratas que aprendieron retuvieron mayor número de neuronas nuevas que las ratas que no, a pesar de que todas se habían sometido al mismo entrenamiento. Es, por tanto, el aprendizaje, y no el entrenamiento o el hecho de colocar los animales en una jaula diferente o de someterlos a una rutina distinta, lo que salva de la muerte a las neuronas nuevas.

VISUALIZACION DE NEURONAS NUEVAS

El compuesto BrdU marca las células que nacen tras la exposición del animal a esa sustancia. En la imagen inferior se distingue una célula recién nacida (el BrdU aparece de color rojo y las regiones verdes que se dejan ver a su través indican que se trata de una neurona). Las neuronas maduras rodean a la reciente.



Quien algo quiere, algo le cuesta

Aunque el aprendizaje es necesario para la supervivencia de las neuronas del hipocampo recién nacidas, no sirve cualquier tipo de aprendizaje. Entrenar a un animal para que nade hacia una plataforma en un estanque no incrementa la tasa de supervivencia celular. Tampoco lo hace entrenarlo para que se percate de que dos estímulos (sonido y estimulación del parpadeo) tienen lugar de forma simultánea.

Esas tareas no consiguen salvar a las células nuevas debido, así nos parece, a que no requieren ningún esfuerzo mental notable. Nadar hacia una plataforma es algo que las ratas hacen con facilidad, para evitar ahogarse. Y si la estimulación del parpadeo coincide en el tiempo con un sonido, los animales no necesitan desarrollar un recuerdo que se remonte hasta un suceso pasado (el sonido original) para predecir el estímulo de parpadeo. Se limitan a responder cuando oyen el mismo sonido.

Creemos que las tareas que rescatan el mayor número de neuronas nuevas son las que resultan más difíciles de aprender; además, requieren del máximo esfuerzo mental para llegar a dominarlas. Para comprobar nuestra hipótesis, seleccionamos una tarea que, aun siendo fácil, representaba un desafío mayor. Comenzamos con el sencillo ejercicio del parpadeo, en el que el sonido precedía a la estimulación del párpado, pero seguía coincidiendo en el tiempo con ella. Como ya se ha indicado antes, el aprendizaje de esa relación no logra rescatar a las neuronas nuevas. A continuación, añadimos complejidad al ejercicio: aumentamos la duración del sonido, de suerte que el estímulo llegara hacia el final de un sonido prolongado.

Con ello aumentaba la dificultad de aprender a parpadear en el momento preciso, pues, en este caso, parpadear poco después de comenzar el tono (como un atleta que empieza a correr tras oír el pistoletazo de salida) no correspondía a la respuesta correcta. La tarea también resultaba más complicada que el ensayo estándar de parpadeo (con un intervalo fijo de 500 milisegundos entre sonido y estímulo) porque el animal no podía utilizar el final del

CORTESIA DE JEAN LIVET, TAMILY WEISSMAN, JOSHUA SANES Y JEFF LICHTMAN *Universidad de Harvard (hipocampo)*; CORTESIA DE BENEDETTA LEUNER (*BrdU*)

sonido como señal de “listo”. Antes bien, la rata debía tratar de recordar el inicio exacto del tono y estimar cuándo tendría lugar la estimulación del párpado, un desafío en toda regla para los animales, humanos incluidos.

Descubrimos que este desafío rescataba tantas neuronas nuevas (y en algunos casos, más) como el ejercicio estándar de parpadeo con pausa fija.

De entre los animales que aprendieron, los que fueron lentos (necesitaron mayor número de ensayos para dominar el ejercicio) acabaron con mayor número de neuronas nuevas que los animales que aprendieron pronto. Parece, por tanto, que las nuevas neuronas del hipocampo responden mejor ante los aprendizajes que requieren un esfuerzo mayor.

Ventana temporal

Se desconoce todavía por qué resulta tan crucial el esfuerzo. Una de las hipótesis avanzadas supone que las tareas que requieren mayor esfuerzo mental (o cuyo dominio demanda períodos de entrenamiento más largos) activan con mayor intensidad las redes neuronales del hipocampo a las que se han incorporado las neuronas recién nacidas, activación que resulta fundamental. Yo me inclino en favor de esta hipótesis por una doble razón.

En primer lugar, varios investigadores han demostrado que las tareas que requieren aprendizaje (por ejemplo, el clásico test de condicionamiento del parpadeo) suelen incrementar la excitabilidad, la actividad, de las neuronas del hipocampo. Además, esa excitación hipocampal va asociada al aprendizaje: los animales que muestran mayor activación son los que aprenden mejor la tarea.

En segundo lugar, parece que existe una ventana temporal crítica en la que el aprendizaje salva a las neuronas recién nacidas. En roedores, la ventana se sitúa entre una y dos semanas después de la aparición de las células. Un estudio reciente realizado sobre ratas indica que el aprendizaje rescata a las células de entre siete y 10 días de edad. El entrenamiento ejercido después de ese período habrá llegado demasiado tarde: las neuronas se estarán muriendo. Si el entrenamiento se desarrolla antes de ese período, será demasiado prematuro como para resultar de ayuda.

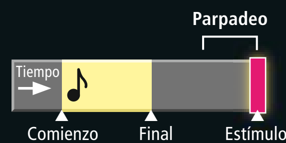
Esa ventana temporal para el aprendizaje se corresponde con el período en que las células recién nacidas, que empiezan a vivir sin estar especializadas, inician su diferenciación en neuronas mediante el desarrollo de dendritas detectoras de señales (reciben impulsos nerviosos procedentes de otras partes del cerebro) y axones que transportan los mensajes al CA3, una región colindante del hipocampo. Más o menos en ese instante, comienzan también

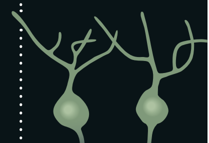


EJERCICIOS DE APRENDIZAJE

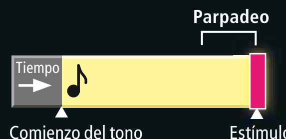
La autora y sus colaboradores se basaron en los experimentos de “condicionamiento del parpadeo” para descubrir que el esfuerzo para aprender incrementa la tasa de supervivencia de las neuronas nuevas. Comenzaron con una variante clásica del experimento (*arriba*). El animal oye un sonido y al cabo de medio segundo recibe un estímulo que le hace parpadear. Tras varios cientos de ensayos, la mayoría de los animales aprenden a parpadear justo antes de la llegada del estímulo. Dado que el sonido y el estímulo ocular están separados en el tiempo, es difícil calcular cuándo hay que parpadear; este ejercicio rescata gran parte de las neuronas recién nacidas.
Las ratas aprenden fácilmente una versión más sencilla del test, en la que el estímulo que provoca el parpadeo coincide en el tiempo con el sonido (*medio*). Este ejercicio no incrementa la tasa de supervivencia de las neuronas nuevas. Cuando se aumenta la complejidad del ejercicio (se hace esperar a la rata durante un período de tiempo más prolongado antes de la llegada del estímulo, *abajo*), se rescatan mayor número de neuronas que en la variante clásica del experimento.

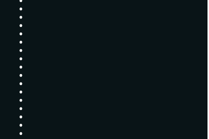
CONDICIONAMIENTO CLASICO CON PAUSA FIJA



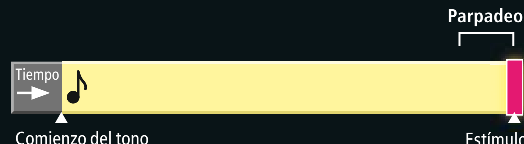


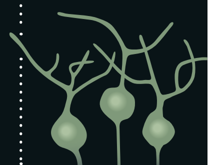
CONDICIONAMIENTO RETARDADO





CONDICIONAMIENTO CON GRAN RETARDO

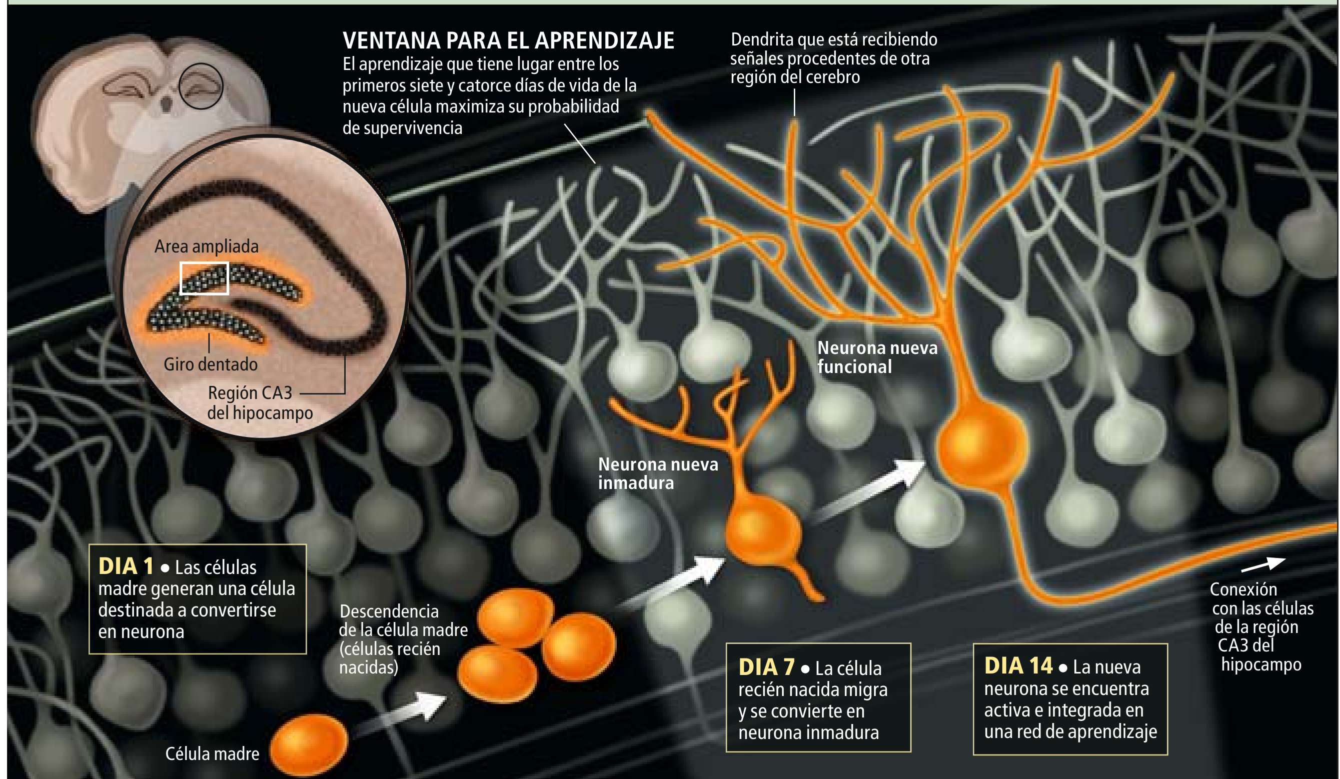




NIGEL CATLIN *Photo Researchers, Inc. (rata)*; JEN CHRISTIANSEN (*ilustraciones*)

BENEFICIOS NEURONALES DEL APRENDIZAJE

Durante su primera semana de vida, las células del hipocampo recién nacidas migran desde los bordes del giro dentado hacia una región más profunda, donde maduran y se integran en una red neuronal. El aprendizaje, que acontece cuando las células tienen entre una y dos semanas, incrementa su tasa de supervivencia (es posible que este efecto se consiga gracias a una estimulación de las neuronas preexistentes, que, a continuación, liberan señales que promueven la maduración de las células jóvenes). En ausencia de aprendizaje, durante el período de maduración, la mayoría de las células nuevas del hipocampo morirán.



JEN CHRISTIANSEN

a responder a determinados neurotransmisores (moléculas portadoras de información entre neuronas).

Tales observaciones sugieren que las nuevas células deben tener cierto grado de madurez y estar integradas en redes neuronales del cerebro antes de responder al aprendizaje. Cuando el aprendizaje entraña dificultad, las neuronas del hipocampo, incluidas las recién incorporadas, se encuentran inmersas en la tarea. Y las recién llegadas sobreviven. Pero si el animal no está sometido a un desafío, las neuronas nuevas carecen de la estimulación que necesitan para sobrevivir y desaparecen.

Función

Cada día surgen en el hipocampo millares de nuevas células, que permanecen si el animal se enfrenta a un aprendizaje. ¿Qué función desempeñan? Por supuesto, no pueden participar en el aprendizaje en tiempo real, conforme van surgiendo. Gran parte del aprendizaje tiene lugar de forma casi instantánea (en cuestión de segundos, si no menos). Enfrentado a una nueva tarea, el cerebro no puede estar esperando una semana para que las nuevas células nazcan, maduren y se integren en entramados funcionales antes de que el animal comience su aprendizaje. Sospechamos que las células acumuladas influyen sobre algunos aspectos posteriores del aprendizaje.

Para someter a prueba esta hipótesis, decidimos deshacernos de las neuronas recién nacidas. Si las células en cuestión, pensábamos, revisten importancia para el aprendizaje, los animales carentes de ellas corresponderían a los "alumnos" menos aventajados. Por supuesto, extraer de un animal todas y cada una de las neuronas nuevas resulta técnicamente imposible. Optamos, pues, por evitar la generación de nuevas células mediante un tratamiento previo de las ratas durante varias semanas con MAM, un fármaco que interrumpe la división celular. Después, mandamos los roedores a clase.

Descubrimos que las ratas tratadas con MAM eran malas estudiantes en el ejercicio estándar de condicionamiento del parpadeo con pausa fija de 500 milisegundos. Les costaba aprender a anticiparse al estímulo. Sin embargo, los animales tratados se defendían bien en muchas otras tareas de aprendizaje que dependían del hipocampo, como el laberinto

BENEFICIOSO O LESIVO

El aprendizaje aumenta la tasa de supervivencia de las neuronas nuevas, pero no repercute en el número de células que se producen. No obstante, se han descubierto otros factores que, en roedores, influyen en la neurogénesis.

PROMOTORES



Ejercicio

Antidepresivos

Arándanos

INHIBIDORES



Alcohol

Nicotina

JEN CHRISTIANSEN

acuático de Morris. En este ejercicio, se introducen en un estanque con un líquido opaco las ratas, que deben nadar hasta encontrar una plataforma sumergida. Las paredes del estanque se encuentran marcadas con referencias espaciales que facilitan la orientación del animal. Las ratas carentes de neuronas recién nacidas aprendían con la misma prontitud que sus compañeras no tratadas.

Los animales tratados con MAM aprendieron también a recordar el lugar donde había ocurrido alguna experiencia emocional. Las ratas que recibieron un estímulo desagradable en la pata cuando se las introducía en una jaula concreta, se quedaban petrificadas cada vez que se las volvía a meter allí. Ese tipo de aprendizaje emocional, el "condicionamiento contextual del miedo", dependía también del hipocampo, pero no suponía ningún problema para nuestros animales tratados.

En resumidas cuentas, la capacidad de aprendizaje de las ratas con pocas neuronas nuevas permanecía relativamente intacta. Los problemas aparecían cuando se trataba de aprender asociaciones de mayor complejidad, como percatarse de que un sonido siempre precede en medio segundo a una estimulación del párpado. Llegamos, pues, a la conclusión de que si las nuevas neuronas eran necesarias para el aprendizaje, intervenían sólo en determinadas situaciones, en apariencia las que implicaban un esfuerzo cognitivo.

En términos biológicos, ese tipo de especialización tiene sentido: un animal preferiría no depender de la producción y desarrollo de toda una cohorte de neuronas nuevas para responder a situaciones que puedan afectar a su supervivencia inmediata. Por tanto, se supone que las células incorporadas, una vez han madurado, son utilizadas para impulsar o perfeccionar aptitudes ya existentes para resolver problemas. En la jerga de la psicología, la intensificación de este tipo de facultades se denomina "aprender a aprender".

¿Qué ocurre en humanos?

Todos los trabajos reseñados hasta aquí se han llevado a cabo con animales de laboratorio (ratas o ratones). ¿Qué ocurriría en humanos que no produjeran neuronas nuevas en el hipocampo? La medicina moderna nos aporta una población de sujetos con estas características: los pacientes sometidos a un tratamiento farmacológico sistémico (quimioterapia) contra el cáncer. Al igual que el tratamiento con MAM, la quimioterapia interrumpe la división celular que resulta imprescindible para la generación de células nuevas. Por tanto, quizá no sea una mera coincidencia el hecho de que los pacientes que se han sometido a quimioterapia se quejen con frecuencia de problemas de aprendizaje o memoria, un síndrome al que en algunas ocasiones se denomina "quimiocerebro".

La observación coincide, en cierto modo, con nuestros resultados en animales. Al igual que los roedores, que manifiestan una discapacidad cognitiva leve o moderada tras el tratamiento con MAM, las personas sometidas a quimioterapia se desenvuelven bastante bien en la mayoría de las situaciones. Se visten, van a trabajar, cocinan, se relacionan con los amigos y la familia; siguen con su vida. Lo cual tiene sentido. A tenor de los resultados obtenidos con animales de laboratorio, *no* deberíamos esperar carencias profundas o persistentes en las funciones cognitivas básicas. Más bien deberíamos esperar déficits selectivos en procesos de aprendizaje de mayor complejidad (el tipo de procesos que suponen un reto para todo el mundo como, por ejemplo, ejercicios multitarea que implican la realización de diversas actividades al tiempo que se intenta asimilar una información nueva).

Para averiguar si la neurogénesis desempeña alguna función en el aprendizaje humano, se requieren métodos no invasivos que permitan detectar en el cerebro neuronas nuevas y métodos reversibles para impedir la maduración de las células durante el proceso de aprendizaje. Se están desarrollando los primeros; los segundos es probable que tarden un tiempo.

Mas supongamos por un momento que disponer de un suministro de neuronas nuevas listas para actuar ayuda a mantener la agilidad mental de nuestro cerebro. En ese caso, ¿podría utilizarse la neurogénesis para prevenir o tratar

CUESTIONES PENDIENTES

Todavía queda mucho por descubrir sobre la influencia del aprendizaje en la tasa de supervivencia de las neuronas nuevas del hipocampo. En primer lugar, interesaría determinar los mecanismos moleculares mediante los cuales los desafíos cognitivos salvan a las células nuevas. ¿Qué neurotransmisores intervienen? ¿Qué proteínas receptoras? ¿En qué momento operan tales mecanismos? ¿Facilita el aprendizaje la integración de las neuronas nuevas en redes neuronales o sólo promueve la supervivencia de las que ya están conectadas? Y no sólo eso, ¿cómo contribuyen a la capacidad de adquirir conocimientos las neuronas producidas por el cerebro adulto?

Ese tipo de investigaciones se están realizando en animales. Convendría, sin embargo, ahondar en la neurogénesis humana (en individuos sanos y en personas que padecen trastornos como la enfermedad de Alzheimer).

Necesitaremos métodos no invasivos para visualizar en el cerebro humano el nacimiento y la muerte de las neuronas recientes. Equipados con estas herramientas, acometeríamos el estudio de algunos aspectos de interés: ¿en qué difieren la neurogénesis de un cerebro sano y la de un cerebro con la enfermedad de Alzheimer?

En última instancia, podríamos también investigar si algún tratamiento —así la terapia génica— incrementaría el número de neuronas nuevas generadas en el hipocampo y si determinadas actividades que ejercitan al cerebro ayudarían a que esas neuronas nuevas permanecieran.



PHOTOALTO *Getty Images*; FOTOILUSTRACION DE JEN CHRISTIANSEN (*título del libro*)

las enfermedades que acarrean un deterioro cognitivo?

Consideremos la enfermedad de Alzheimer. En este trastorno, la degeneración de las neuronas del hipocampo provoca una pérdida progresiva de la memoria y de la capacidad de aprendizaje. Quienes lo padecen siguen produciendo neuronas nuevas, pero parece que muchas de ellas no sobreviven para convertirse en células maduras. Es posible que en esos individuos los procesos de neurogénesis y maduración neuronal estén dañados. O quizá las nuevas células no sobreviven porque la enfermedad merma la capacidad de aprender.

Con todo, algunos descubrimientos resultan esperanzadores, al menos para quienes se encuentran en las primeras etapas de la demencia. Estudios realizados en personas y animales sugieren que el ejercicio aeróbico y otras actividades sencillas impulsan la generación de nuevas neuronas. Además, se ha descubierto que los antidepresivos son potentes moduladores de la neurogénesis. Cierto estudio realizado en 2007 demostró que el tratamiento crónico con antidepresivos mejoraba las actividades cotidianas y el funcionamiento global en pacientes con la enfermedad de Alzheimer, un indicio, al menos, de que este tipo de terapia podría promover la producción y la supervivencia de neuronas nuevas.

El anecdotario sugiere que el aprendizaje que requiere esfuerzo puede también ayudar a algunos pacientes. En fecha reciente presenté los resultados de nuestros estudios sobre animales en un congreso centrado en la enfermedad de Alzheimer y otras formas de demencia. Los médicos de la audiencia se mostraron fascinados por nuestros descubrimientos, que sugerían que los esfuerzos realizados para aprender algo difícil ayudan a preservar las neuronas recién establecidas. Ya se han publicado trabajos en los que han comprobado los beneficios que este tipo de esfuerzo produce en sus pacientes. Y se han dado cuenta de que los pacientes que son capaces de involucrarse de lleno en actividades exigentes desde el punto de vista cognitivo pueden frenar el avance de esta enfermedad que les roba la mente.

Por supuesto sería necio pensar que la combinación de actividad cognitiva con antidepresivos o con actividad física revierte el deterioro causado por la enfermedad de Alzheimer, que mata a muchas otras células cerebrales, no sólo a las nuevas. Pero podría darse el caso de que ese tipo de actividades frenase el deterioro cognitivo en las personas que padecen trastornos degenerativos y quizás en todos nosotros, a medida que envejecemos.

Se dice que no es posible enseñar trucos nuevos a un perro viejo. Ciertamente, en la etapa adulta para muchos de nosotros resulta difícil aprender algo nuevo. Pero si queremos mantener nuestro cerebro en forma, no nos hará ningún daño combinar el ejercicio físico con el aprendizaje de un idioma, unas lecciones de claqué o la práctica de algún juego que exija reflejos rápidos. Hasta podría resultar beneficioso.

SI LOS HALLAZGOS EN ROEDORES pudieran extenderse a los humanos, cuanto más exigente fuera un ejercicio cognitivo más probable resultaría que salvara las neuronas recién formadas.

Bibliografía complementaria

LEARNING ENHANCES ADULT NEUROGENESIS IN THE HIPPOCAMPAL FORMATION. Elizabeth Gould, Anna Beylin, Patima Tanapat, Alison Reeves y Tracey J. Shors en *Nature Neuroscience*, vol. 2, n.º 3, págs. 260-265; marzo, 1999.

NEUROGENESIS IN THE ADULT IS INVOLVED IN THE FORMATION OF TRACE MEMORIES. Tracey J. Shors, George Miesegaes, Anna Beylin, Mingrui Zhao, Tracy Rydel y Elizabeth Gould en *Nature*, vol. 410, págs. 372-376; 15 de marzo, 2001.

NEUROGENESIS, LEARNING AND ASSOCIATIVE STRENGTH. Jaylyn Waddell y Tracey J. Shors en *European Journal of Neuroscience*, vol. 27, n.º 11, págs. 3020-3028; junio, 2008.

Espuma de montaña

Josep-Maria Gili, Francesc Sabater, José M. Fortuño



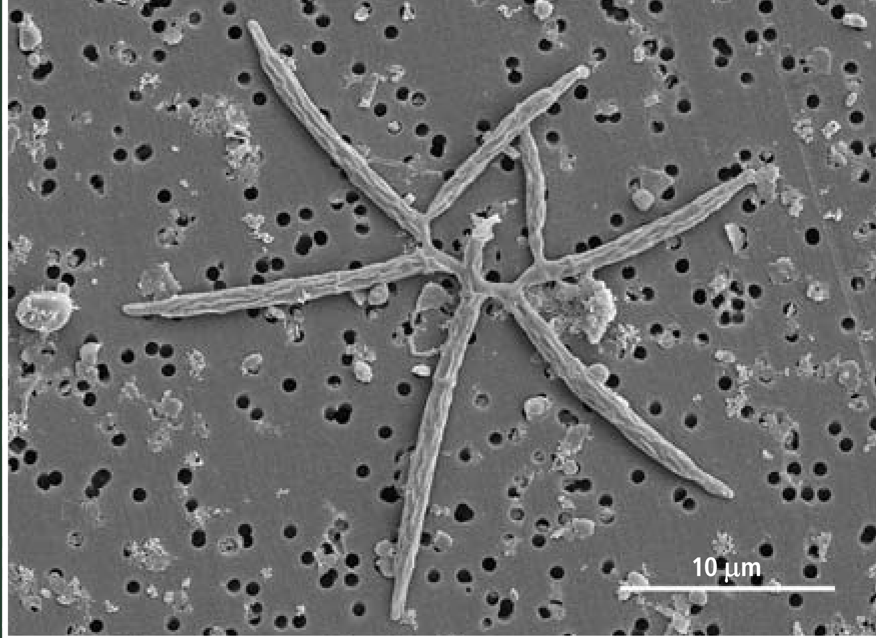
La primera impresión que tenemos al observar la formación de espumas en lugares próximos a zonas habitadas es que nos hallamos frente a una manifestación de contaminación. Sin embargo, no siempre es así. En ocasiones, estas espumas resultan de la elevada producción del sistema natural.

Después de unas fuertes lluvias, en los arroyos de montaña aparecen acumulaciones en forma de espuma: se trata de una concentración de lixiviados de materia orgánica disuelta. Estos lixiviados proceden de la escorrentía superficial que atraviesa los horizontes orgánicos de los suelos forestales. La descomposición de la materia orgánica por parte de hongos hifomicetes relaja la tensión superficial del agua (debido en parte a la formación de ácidos volátiles como el fúlvico) y posibilita la constitución de una estructura esponjosa de menor densidad.

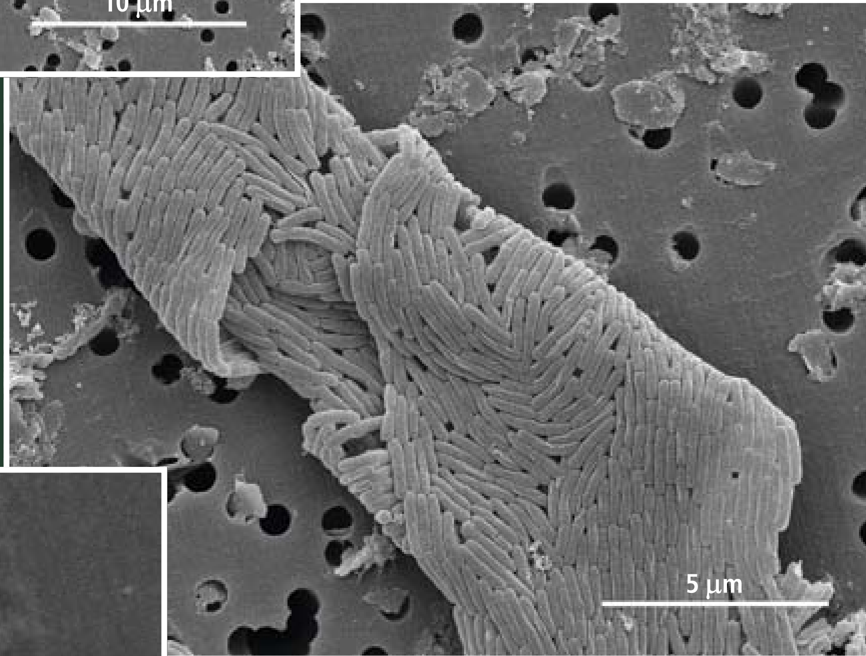
Esa estructura se mantiene durante horas, merced a un esqueleto de hifas que sostiene una abundante cantidad y diversidad de organismos y partículas, que se ven arrastrados por las aguas: protozoos, nemátodos, microcrustáceos, esporas de hongos, granos de polen y diatomeas.

1. Paisaje de montaña, donde se aprecia el transporte de las aguas de lluvia. En su curso hacia los ríos se forman espumas (*detalle*).

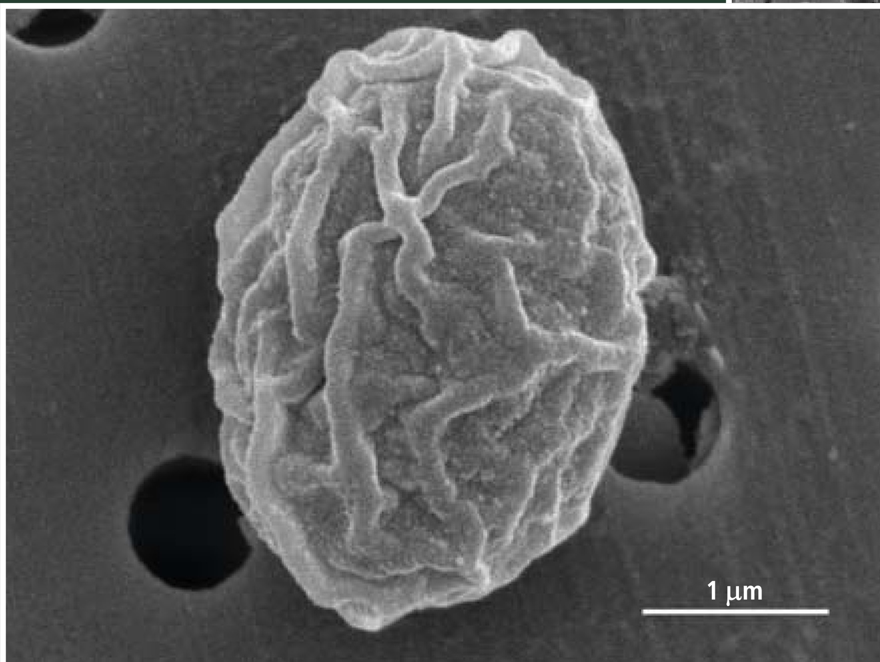
JOSEP-MARIA GILI, FRANCESC SABATER Y JOSE M. FORTUÑO



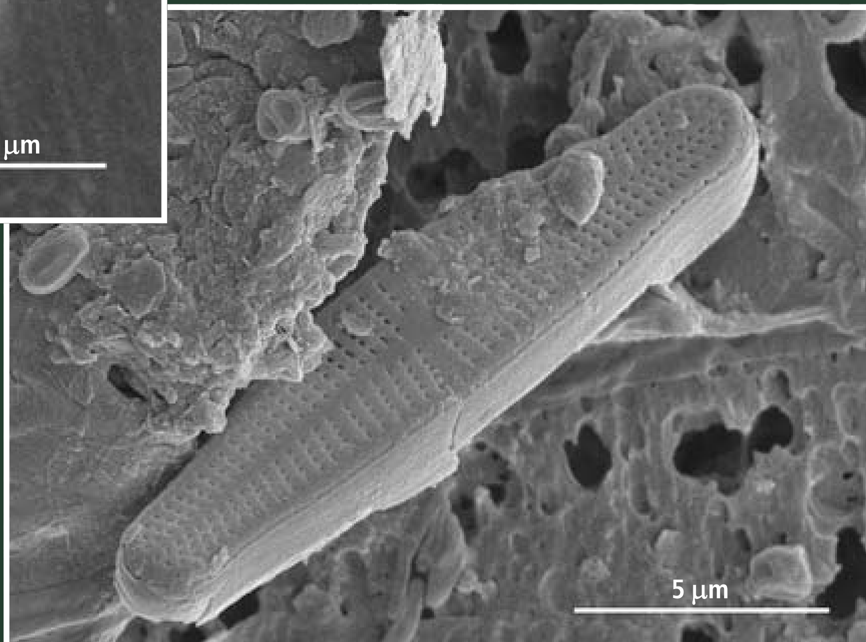
◀ 2. Grupo de hifomicetes asociados a la materia orgánica en descomposición.



▶ 3. Colonias de bacterias recubren los restos de detritus vegetales, prueba de la elevada producción biológica de esta estructura singular.



◀ 4. Grano de polen atrapado entre las hifas de la espuma.



▶ 5. Diatomea, alga bentónica unicelular muy abundante en los ecosistemas fluviales.

Camille Parmesan: huida de los campos de la muerte

Al calentarse el mundo, algunas especies no logran desplazarse a tiempo hacia climas más benignos para sobrevivir. Camille Parmesan piensa que deberíamos echar una mano, aun cuando ello suponga convertir a algunas especies en invasoras

David Appell

A Camille Parmesan no le importó que Rush Limbaugh le denigrara en su famoso programa de radio. "Hasta me gustó", dice, a pesar de que el presentador tomase a chacota sus estudios sobre la deriva geográfica de una especie de mariposa a causa del cambio climático. "Pensé que si le enojaba tanto era señal de que cuanto yo hacía iba dejando alguna huella".

Aquello sucedió en 1996. Desde entonces, se ha convertido en una de las biólogas conservacionistas más renombradas entre quienes vigilan la repercusión del cambio del clima en plantas y animales. Al igual que muchos de sus colegas, predica a los cuatro vientos sobre los peligros ecológicos. Pero a diferencia de los demás, propone una manera de salvar especies amenazadas muy curiosa: ayudarles a migrar y colonizar.

Esta controvertida manera de proceder, razona, puede que sea el único modo de salvar especies en peligro incapaces de adaptarse a la insólita tasa de cambio actual o de escapar a climas más propicios. Se deberían realizar trasplantes, dice, incluso a riesgo de engendrar nuevas enfermedades y epidemias u otras consecuencias imprevistas. Algunos científicos han empezado a tomarse en serio lo que dice; ya se reúnen para tratar del asunto y elaborar modelos que vayan más allá de las acostumbradas predicciones climáticas.

Parmesan no sostenía aún tales opiniones cuando publicó en 1996 su estudio clásico sobre las tribulaciones de *Euphydryas editha*, una delicada mariposa, moteada de manchas marrones, naranjas y blancas, cuya envergadura a veces no supera el centímetro. Se había pasado casi cinco años vagando por la costa pacífica, desde México hasta Canadá, y arrastrándose bajo la planta de este insecto, una herbácea parecida a la boca de dragón. Sólo una vez la echaron de malos modos, en Baja California; fue un personaje que se portó "como un verdadero capo de la droga", recuerda.



CORTESIA DE MICHAEL C. SINGER

CAMILLE PARMESAN

MUDANZA: aboga por la "migración asistida". El hombre debería trasplantar especies para librarlas de las variaciones ecológicas causadas por el rápido cambio climático.

FUTURO INQUIETANTE: que la Tierra se haya calentado 0,7 grados centígrados desde la época preindustrial ha provocando que el 40 por ciento de las especies cambien su área de distribución. De seguir como hasta ahora, la producción de energía, la cifra puede llegar al cien por cien, y el 75 por ciento de ellas quedarían afectadas negativamente.

Esta mariposa es muy sensible a la temperatura porque su planta hospedadora se seca si hace demasiado calor; el insecto, en fase de oruga, se queda entonces sin su fuente alimenticia. Ya se sabía que el desarrollo humano y el clima habían menguado su población, pero la ciencia sistemática de Parmesan sorprendió a todos: tres cuartas partes de las poblaciones en las latitudes más bajas se habían extinguido, mientras que sólo el 20 por ciento de las canadienses había desaparecido. Las poblaciones de altitudes más elevadas tenían una probabilidad de extinguirse tres veces menor que las que medraban en las zonas más bajas y cálidas.

Parmesan, adscrita hoy a la Universidad de Texas en Austin, se percató muy pronto de tendencias similares entre las mariposas de Europa, donde los registros de sus demarcaciones datan de tiempos más remotos. Un posterior análisis, llevado a cabo con David Easterling, del Centro Nacional de Datos Climáticos en Asheville (Carolina del Norte), y Gary Yohe, de la Universidad Wesleyana, sacaron a la luz pruebas de cambio climático en casi todos los ca-

sos investigados. Plantas y animales habían desplazado sus áreas de distribución hacia los polos a razón de seis kilómetros por decenio durante el último cuarto de siglo.

Más. Los episodios primaverales, como la floración, la reproducción de las ranas o la llegada de las aves migratorias, se han adelantado a razón de 2,3 días por decenio. Los patógenos tropicales están remontando latitud arriba y atacan especies sin preparación para hacerles frente. Se cree que se han extinguido aproximadamente dos tercios de las 110 especies conocidas de ranas arlequín en Costa Rica como resultado de los estragos causados en su sistema inmunitario —debilitados por las altas temperaturas— por un hongo letal, que a su vez aprovechó ese aumento del calor.

El pasado mes de diciembre se anunció la probable extinción de un mamífero —sería el primero— provocada por el cambio climático: la zarigüeya lemúrida blanca, desaparecida de Queensland (Australia). Para matar a una de estas zarigüeyas, que sólo vivían por encima de los 1000 metros de altitud, bastaba someterlas a cinco horas de temperaturas superiores a 30 grados centígrados. Aunque todavía no se pueden hacer predicciones precisas, Chris D. Thomas, de la Universidad de Leeds, y sus colaboradores han visto que, aun suponiendo un calentamiento global mediano, entre un 15 y un 37 por ciento de las especies terrestres quedarían "condenadas a la extinción" para el año 2050. Añádanse las amenazas ya existentes —la destrucción de hábitats y las barreras a las migraciones en forma de ciudades y carreteras—, y el futuro de la biodiversidad mundial pintará cada vez peor.

Fue todo uno comprender el impacto que el calentamiento global estaba causando en las especies salvajes y documentar la extinción de algunas, dice Parmesan, y empezar a pensar cómo se podría salvarlas. A falta de que los gobiernos se empeñen en reducir drásticamente las emisiones de los gases causantes del efecto invernadero, ella fue una de las pioneras en ponderar actuaciones alternativas, en particular la ayuda humana. Considera Parmesan que la migración asistida (como se ha dado en llamar la forma de proceder por la que aboga) es la única esperanza de salvar a al menos algunas especies, aunque sólo abarque una pequeña proporción de las que se encuentran en peligro.

EN APRIETOS: la mariposa *Euphydryas editha*, a la que se muestra aquí apareándose, está extinguiéndose conforme sube la temperatura y se seca la planta de que se alimenta.



CORTESIA DE CAMILLE PARMESAN

Jessica J. Hellmann, bióloga conservacionista de la Universidad de Notre Dame, cree que la mayor parte de las migraciones asistidas requerirán un paladín que adopte alguna especie en particular por razones sentimentales, o mejor aún, económicas. (No es de extrañar que Parmesan tenga en mente algunas especies de mariposas occidentales.) Las empresas madereras ya tienen en cuenta el cambio climático a la hora de plantar árboles que serán talados en un plazo de decenios.

Un grupo de voluntarios, los Guardianes de la Torreya, está intentando la "suelta" de la torreya de Florida, una conífera en peligro. Confinada en estrecha franja de 65 kilómetros en la cuenca del río Apalachicola, su población comenzó a menguar en los años cincuenta, a causa probablemente de un hongo patógeno, y se piensa que "se quedó rezagada" en un hábitat arrinconado y bloqueado que ha impedido su migración hacia el norte. El año pasado plantaron varias docenas de retoños en una finca privada de Carolina del Norte, primera medida que se desea ampliar.

La migración asistida, como reconoce Parmesan, les horroriza a algunos biólogos conservacionistas. "Se pasan buena parte del tiempo luchando contra las especies invasoras; una de las causas principales de que una especie se vea en peligro es la competencia desigual con otra invasora". En el caso particular de los Guardianes de la Torreya, "muchos biólogos se quedaron desazonados porque les parece que no se ha hecho un trabajo de campo que comprobase cómo iba a afectar a la [nueva] comunidad", dice. Ella aboga por estudios sistemáticos de los hábitats donde medran las especies amenazadas, que aborden los posibles peligros al acecho.

Convendría disponer de mejores útiles teóricos. Los que se tienen ahora, los "modelos climáticos envolventes", se limitan a considerar la temperatura, la cantidad de precipitación y los tipos de suelo que prefiere una especie; introducen esos datos en un modelo normal del clima para predecir hacia dónde podría migrar naturalmente una especie si no hubiera obstáculos artificiales, ni se contara con la asistencia del hombre.

Hellmann trabaja en un modelo que incluye elementos biológicos, tales como la genética y la competición entre especies (a qué otras especies se atraería o se pondría en peligro, las respuestas evolutivas y otros detalles por el estilo), porque las poblaciones con frecuencia varían genéticamente a lo largo y ancho de su área de distribución. Con tales datos, subraya, "quizá podamos obtener reglas sencillas que nos ayuden a establecer prioridades para las poblaciones".

La migración asistida constituye un concepto introducido en círculos académicos que apenas si ha prendido entre las organizaciones tradicionales de conservación del medio. Nature Conservancy está evaluando la idea. "La migración asistida es una opción un punto radical", dice Patrick González, experto en cambio climático de esa organización, "pero se podría considerarla si fallan todas las demás y una especie está en peligro de extinción. Comporta muchos riesgos".

A Parmesan le enervan semejantes prevenciones. En 2008 firmó un artículo en la revista *Science* donde proponía un "marco para la toma de decisiones" relativas a la posible reubicación de especies amenazadas. "Si no hacemos nada, estaremos poniendo en peligro la biodiversidad. Los gestores de recursos ambientales tienen la manía de que lo bueno es no hacer nada, y yo creo que quedarse de brazos cruzados es malo".

La necesidad de políticas estables

Un bandazo exagerado hacia el estímulo de la economía sólo retardará el regreso de una prosperidad sostenible

Jeffrey D. Sachs

El sistema político-económico de EE.UU. pone de manifiesto un fenómeno conocido como "inestabilidad de los instrumentos". Los gestores y políticos de la Reserva Federal y la Casa Blanca intentan estabilizar la economía nacional con políticas monetarias y fiscales muy imperfectas, pero sólo para que la política económica conozca giros aún más desesperados encaminados a impedir recesiones que no se pueden evitar del todo.

Para contrarrestar la recesión, el equipo del presidente Barack Obama busca generar un estímulo económico sin precedentes mediante grandes déficit presupuestarios y tipos de interés nulos. Estas políticas pueden funcionar a corto plazo, pero amenazan con crear una crisis aún mayor en los próximos años. La recuperación será más rápida si las políticas a corto plazo se sitúan dentro de un contexto a medio plazo.

No hay duda de que los bandazos excesivos en la política macroeconómica han contribuido sobremanera a la crisis actual. Durante el decenio 1995-2005, el entonces director de la Reserva Federal, Alan Greenspan, reaccionó exageradamente ante ciertas sacudidas económicas. Cuando la turbulencia financiera golpeó en 1997 y 1998 —la crisis asiática, el colapso del rublo ruso y la quiebra del fondo de inversión libre Long-Term Capital Management—, la Reserva Federal aumentó la liquidez y, sin proponérselo, ayudó a que creciera la burbuja de las "punto com". La Reserva Federal fue aún menos restrictiva en 1999, en previsión de la ilusoria amenaza informática del "Efecto 2000". Cuando posteriormente, en 2000, endureció el crédito y estalló la burbuja de las punto.com, rápidamente dio un nuevo giro y volvió a bajar los tipos de interés. La expansión de la liquidez se amplió sobremanera tras el 11-S, cuando la Reserva Federal recortó drásticamente los tipos hasta llegar a un mínimo del 1 por ciento en junio de 2003), y así ayudó a inflar la burbuja inmobiliaria que ahora ha reventado.



Deben evitarse las políticas a corto plazo que supongan bandazos desestabilizadores. Los déficit masivos y los tipos de interés nulos pueden hacer repuntar el consumo temporalmente, pero a riesgo del desplome de la moneda, de la pérdida de confianza en el gobierno y de crecientes dudas sobre la capacidad que tiene de pagar sus deudas, consecuencias que podrían frustrar, más que acelerar, la recuperación del consumo privado y la inversión. Aunque incurrir en déficit público durante una recesión sea razonable, los déficit deberían permanecer limitados (inferiores al 5 por ciento del PNB) y los tipos de interés, mantenerse lo suficientemente alejados de cero como para evitar futuros vuelcos.

También deberíamos evitar adelgazar más los ingresos del gobierno con nuevos recortes de impuestos. Los ingresos provenientes de los impuestos son ya demasiado bajos para cubrir los gastos del gobierno, especialmente cuando tenemos en cuenta la creciente e insatisfecha necesidad de invertir en salud, educación, gobierno estatal y local, energía limpia e infraestructuras. Hemos de seguir una trayectoria en la que vayan aumentando los ingresos fiscales para equilibrar los presupuestos dentro de los próximos años.

Aún más importante es detener el pánico. Una de las razones por las que nos metimos en este desastre fue el miedo exagerado de la Reserva Federal, en 2002 y 2003, a que EE.UU. siguiera a Japón en tener un decenio de estancamiento provocado por la deflación (la caída de precios). Para evitar una deflación, la Reserva Federal creó una burbuja. ¡Ahora la burbuja ha estallado y hemos acabado sufriendo la deflación que temíamos! El pánico acaba mal, incluso en política; las políticas más moderadas serán más seguras a medio plazo.

Hay pocas razones para temer diez años de estancamiento y mucho menos una depresión. La economía de EE.UU. es tecnológicamente dinámica y muy flexible. La economía mundial tiene un potencial extraordinario de crecimiento, si no acabamos en un conflicto financiero y comercial y si los bancos centrales aseguran una liquidez adecuada para evitar que el pánico afecte a bancos, empresas y prestatarios soberanos. La Gran Depresión fue el resultado de un terrible pánico bancario en Estados Unidos, en una época sin garantías de depósitos y cuando la Reserva Federal y el Congreso no entendían el papel fundamental de una entidad crediticia de último recurso.

En suma, aunque la crisis aguda durará inevitablemente otro año, incluso dos, no necesitaremos tipos de interés del cero por ciento y megadéficit para evitar una depresión o para tratar de provocar una recuperación. De hecho, la recuperación a largo plazo y sostenible llegará antes con un marco de políticas encaminadas a que el presupuesto recupere el equilibrio de forma creíble a lo largo de varios años, a que el gobierno cumpla con sus responsabilidades primordiales en servicios sociales, infraestructura y regulación, y a que la Reserva Federal evite peligrosos giros en los tipos de interés que en realidad contribuyen a los altibajos que pretendemos evitar.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

MATT COLLINS

LONGEVIDAD DEL TRANSISTOR

El componente básico de la revolución informática, aunque ha cambiado de forma, material y modo de fabricación, no ha podido reemplazarse en medio siglo

Robert W. Keyes

El *New York Times* propone el 22 de octubre de 1985, en su sección científica, que sea la luz, y no la electricidad, el fundamento de unos nuevos computadores. AT&T avanza en esa línea y monta un prototipo de computador óptico, que en 1990 inspira este titular del *Wall Street Journal:* "¿Es la computación óptica la próxima frontera o sólo una idea elegante?" En realidad, es algo más que "elegante": los fotones se desplazan con más rapidez que los electrones. Sin embargo, el prototipo de AT&T no era comparable con los métodos eléctricos bien establecidos y quedó como el último intento serio de comercializar la computación óptica.

Pese a todo, la investigación teórica y académica no ha cesado. En febrero de 2008 *Infoworld Media* considera que la computación óptica es "una de esas excentricidades que podrían conmover el mundo de la información"; en último término se le podrían encontrar ciertas aplicaciones, como la transferencia de enormes ficheros de datos, pero no parece haber opción viable que sustituya al transistor en la computación propiamente dicha.

¿Cuál es la razón? ¿Por qué ciertos dispositivos son aptos para la computación y otros fallan, a pesar de haberles dedicado cuantiosos recursos de investigación y desarrollo?

Una razón esencial es el coste: para construir un computador —eléctrico, óptico o de otro tipo—, se han de conectar numerosos circuitos sencillos, cada uno de ellos formado por millones de dispositivos electrónicos elementales. Un número tan elevado de componentes exige que los dispositivos básicos tengan un coste muy bajo; no es posible probarlos y ajustarlos uno a uno.

El componente esencial de un computador moderno es el circuito integrado (chip), a su vez constituido por dispositivos de varios tipos. Contiene una cantidad ingente de transistores. Los circuitos se obtienen hoy de obleas circulares de silicio, de unos 30 centímetros de diámetro, que al final del tratamiento se subdividen en cientos de chips. El proceso de fabricación comprende una larga serie de etapas: un grupo de obleas se expone a reactivos químicos y modificaciones de sus superficies y, además, atraviesan ciclos de calentamiento y enfriamiento.

Dentro de las cámaras de procesamiento, será inevitable que las condiciones sufran alguna variación al pasar de un punto a otro de una oblea grande; esto ocasionará pequeñas diferencias de una a otra oblea, así como entre los dispositivos situados en distintos puntos de una misma oblea. Por tanto, esos dispositivos no son objetos perfectamente reproductibles que satisfagan especificaciones muy precisas. Además, mientras trabajan están sujetos a calentamiento y enfriamiento y a intensas

CONCEPTOS BASICOS

- Los componentes de los circuitos de los ordenadores reciben señales físicas cuyo valor han de interpretar, asignándolo a uno de dos significados lógicos, para, a su vez, emitir nuevas señales que deberá poder entender inequívocamente otro componente.
- Los transistores se encargan de esa labor desde hace sesenta años. Aunque se ha intentado sustituirlos con otro tipo de dispositivos —ópticos, biestables o mecánicos—, ninguno ha podido desplazarlos.



1. UNA REPLICA DEL PRIMER TRANSISTOR, creado en 1947 por John Bardeen y Walter Brattain. Medía 1,27 centímetros de altura y tenía un solo punto de contacto. Los transistores han evolucionado para adaptarse a otras formas de operar y han reducido mucho su tamaño, gracias a la constante mejora de los procesos de fabricación. No han encontrado rival que pueda desplazarlos en los ordenadores.

CORTESIA DE ALCATEL-LUCENT USA INC./*American Scientist*

corrientes eléctricas. Con el tiempo pueden producirse nuevos cambios. Los circuitos de computación deben, pues, ser capaces de funcionar, aunque existan diferencias apreciables entre dispositivos nominalmente idénticos.

Se han presentado alternativas al transistor que prometían buenos resultados en condiciones de laboratorio, pero hasta ahora ninguna ha logrado superar los estrictos requisitos de una producción masiva. Más difícil resulta salvar las restricciones que impone el tipo de señales que requiere la computación.

Traslado de los datos

En el propio proceso de computación, puede que los datos tengan que atravesar una larga serie de circuitos para llegar a un resultado. Así ocurre en las simulaciones de la evolución en el tiempo de un sistema físico del mundo real, de la secuencia de fases de una explosión o de la predicción de un cambio climático. El resultado de una etapa se toma como entrada para la etapa siguiente. No puede admitirse que, durante un proceso prolongado, se acumulen pequeños errores, como los debidos al ruido eléctrico o a un dispositivo defectuoso, pues falsearían los resultados finales.

Sabemos muy bien que el modo de impedir la propagación de errores a través de una cadena operativa es la representación digital de los datos. Desde la antigüedad se ha utilizado información digitalizada (marcas sobre un palo o piedras apiladas), y durante más de mil años se ha calculado con el ábaco. La palabra "digital" significa que la información se representa por medio de un pequeño conjunto (dos o más) de posibles valores de una magnitud física.

Los computadores actuales trabajan en el sistema digital binario: la unidad de información llamada "bit" (*bi*nary digi*t*) recibe dos valores posibles (1 y 0), equivalentes a "verdadero" y "falso". El soporte lógico del computador ejecuta funciones definidas por

tablas de *ceros* y *unos*. Sirvan de ejemplo las operaciones "AND" y "NOR": la primera dará resultado 1 cuando estén presentes ambas entradas; la segunda, cuando no lo esté ninguna. Los resultados binarios pueden luego traducirse a otros formatos —cifras decimales, caracteres alfabéticos— para presentarlos a los usuarios.

En el computador se utilizan dos voltajes eléctricos, idénticos en toda la máquina, como valores de señal normalizados: uno de ellos representaría el *cero* y el otro el *uno*. El resultado de la operación de un circuito lógico se traslada al circuito siguiente accionando un conmutador que conecta uno de los dos voltajes normalizados. La señal enviada no depende de las características del circuito que activó el conmutador.

Es por tanto imprescindible que cualquier dispositivo diseñado para reemplazar al transistor en un circuito lógico pueda transmitir datos en forma digital, discreta. Las señales ambiguas inducirán a error y posiblemente al fallo del sistema entero. Los transistores trabajan con datos digitales puesto que sólo admiten dos estados, "on" (activo) y "off" (inactivo). En esencia, son conmutadores; de hecho, provienen de ese tipo de dispositivo físico.

Evolución del conmutador

Las primeras máquinas calculadoras eléctricas utilizaban relés mecánicos —pequeñas armaduras controladas por electroimanes— como conmutadores. Aunque cumplían su objetivo, los relés eran más lentos que los dispositivos electrónicos y provocaban frecuentes fallos, pues los contactos se pegaban y se ensuciaban.

En los sistemas grandes, los relés se sustituyeron por tubos (válvulas) de vacío, unas ampollas de cristal de las que se ha extraído el aire, con un filamento caldeado (cátodo) en un extremo y una placa (ánodo) en el otro extremo. El filamento emite electrones que son atraídos a la placa, sometida a un voltaje positivo. Entre filamento y placa interviene un plano de hilos denominado rejilla, que actúa como electrodo de control. Un pequeño voltaje positivo aplicado a la rejilla amplifica la corriente de electrones de cátodo a placa; si el voltaje de rejilla fuera negativo, repelería los electrones procedentes del cátodo y cortaría la corriente.

El uso de válvulas de vacío permitía trabajar mucho más deprisa que con los relés mecánicos, aunque el caldeo de los filamentos consumiera grandes cantidades de energía. Los monstruosos computadores de los comienzos, ejemplares únicos como el Colossus británico y el ENIAC estadounidense, cuya utilidad quedó bien patente, estaban construidos con válvulas de vacío. Cada computador de la red de defensa aérea SAGE contenía 55.000 válvulas y consumía tres megawatt de potencia eléctrica. Los computadores de válvulas dieron lugar también a una pujante industria informática, representada por el UNIVAC de Sperry-Rand y la serie IBM 700, de principios de los años cincuenta.

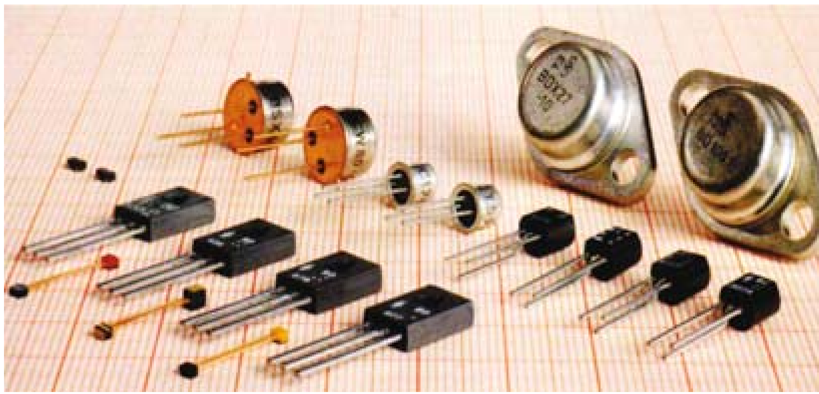


2. EL TRANSISTOR (*izquierda*) reemplazó a la válvula de vacío (*derecha*): ofrece más fiabilidad en un espacio mucho menor con gran ahorro de energía.

LEONARD LESSIN/*Peter Arnold, Inc./American Scientist*

La invención de un conmutador de estado sólido, el transistor, volvió a transformar la electrónica en 1947. Por su pequeño tamaño, baja demanda energética y fiabilidad muy elevada, se difundieron rápidamente en la industria informática y en otras aplicaciones electrónicas. Tanto fue así, que la revista *Fortune* designó 1953 como el Año del Transistor. La combinación de propiedades deseables que ofrecía permitió instalar gran número de ellos en un solo sistema. El computador IBM 7030 "Stretch", de 1961, contenía 17.000 transistores.

Los transistores se fabrican con una clase de materiales, los semiconductores, que en ciertas condiciones conducen la electricidad, pero en otras impiden su paso, propiedad necesaria para que un conmutador presen-



3. LA MAYORIA DE LOS TRANSISTORES se encuentran hoy en circuitos integrados; aun así, todavía se producen transistores sueltos para aplicaciones especializadas.

te los estados "on" y "off". La naturaleza de las bandas de energía, que según la mecánica cuántica mantienen los átomos unidos formando cuerpos sólidos, permite considerar que en los semiconductores hay corrientes de partículas de carga positiva y de partículas de carga negativa. Las partículas de carga positiva se llaman "huecos", es decir, lugares en los que falta un electrón. Pequeñas cantidades de otro material, llamado impureza o dopante, añadidas al semiconductor, aportan los electrones y huecos; el predominio de la transmisión de electrones o de huecos en el semiconductor depende del tipo de dopante. Los materiales que conducen electrones se denominan de tipo N (negativo); de tipo P (positivo), los que conducen huecos.

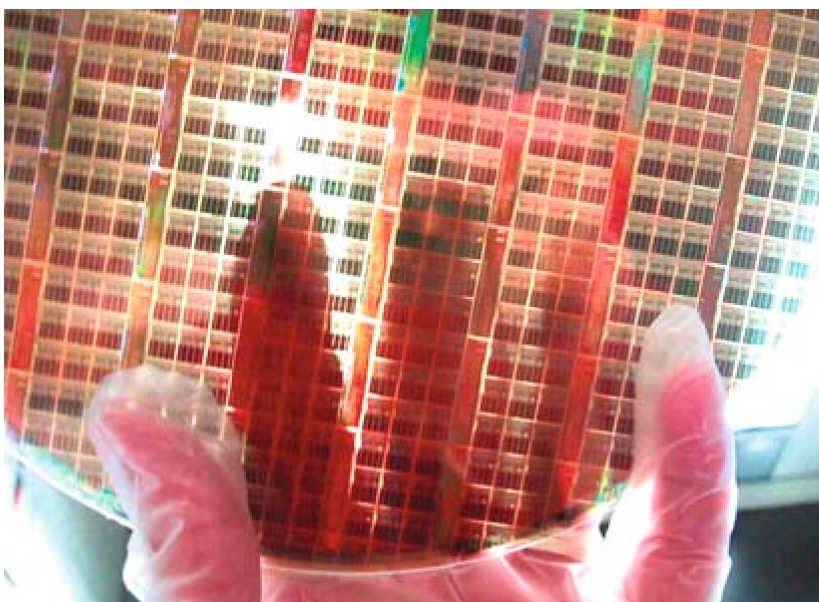
Para que un transistor funcione se necesitan materiales de tipo N y de tipo P. El primer modelo de transistor comercial, el transistor de unión bipolar, utilizaba una capa de semiconductor de un tipo intercalada entre dos capas del otro tipo, lo que creaba dos uniones de los tipos N y P. La corriente aplicada a la sección central por un hilo delgado, llamado electrodo base, controla si el transistor conducirá corriente o no.

El transistor de efecto campo (FET), desarrollado después del de unión bipolar, es el que suelen utilizar los computadores. Presenta sólo una unión de materiales tipo N y tipo P. El electrodo puerta está separado de la superficie semiconductora por una delgada capa aislante. La cantidad de carga en la puerta puede controlar una corriente de electrones que atravesará el transistor desde el electrodo fuente hasta un hilo de drenaje (el drenador). En un FET tipo N, por ejemplo, la carga positiva en el electrodo puerta atrae electrones a la superficie y crea un canal de conducción en el semiconductor para el paso de la corriente.

Los transistores comerciales fueron en principio dispositivos discretos, que tenían que conectarse individualmente a un circuito. La invención del circuito integrado en 1960 revolucionó aún más la industria de la computación al poder fabricar e interconectar un gran número de transistores en una sola pastilla de silicio, el chip, lo que redujo espectacularmente los costes de fabricación. El continuo avance del grado de integración durante los años sesenta dio origen a la célebre ley de Moore: cada año se duplicaba el número de transistores que admitía el circuito integrado. La tendencia persistió durante muchos años, allanando el camino hacia computadores cada vez más asequibles y potentes. Un chip puede hoy contener cerca de mil millones de transistores.

Gran parte de ese crecimiento se ha logrado gracias a la miniaturización de todos los componentes del chip. El factor predominante en el coste de fabricación es el número de obleas procesadas; influye muy poco el contenido de cada oblea. En consecuencia, el aumento del número de dispositivos instalados por unidad de superficie de silicio se traduce en un rápido descenso del coste por dispositivo. Lo que nos lleva a una nueva generalización, la de que el coste de los circuitos integrados por unidad de área de silicio ocupada se ha mantenido mucho tiempo constante pese al creciente número de transistores integrados en esa área. El precio actual de un transistor en un circuito integrado no llega a 0,002 céntimos, la décima parte de lo que cuesta una grapa.

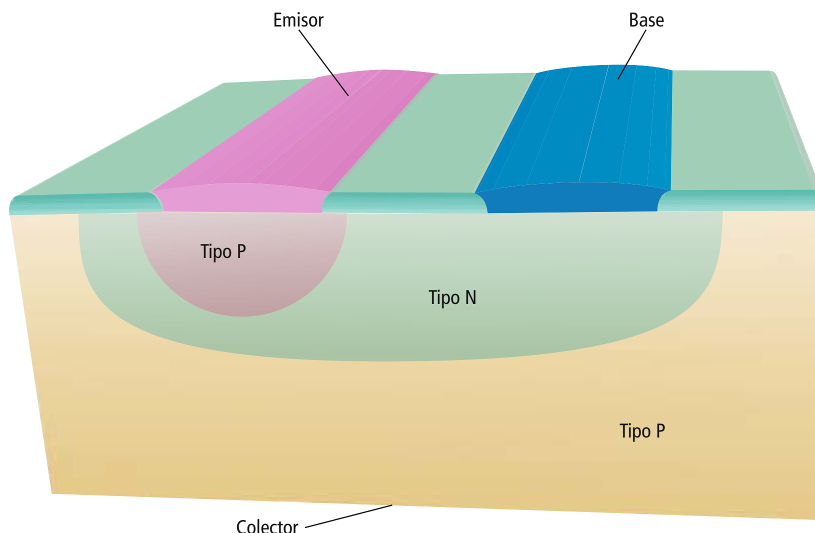
Cuando ya pudieron integrarse en un chip varios miles de transistores, se inventó el microprocesador, un computador diminuto en un solo chip. Este elemento permitió incorporarles funciones bastante complejas a diversos tipos



4. EN UNA OBLEA DE SILICIO del tamaño de un plato de comer se han grabado cientos de chips de circuito integrado, cada uno de los cuales contiene mil millones de transistores.

CORTESIA DE MIKROELEKTRONIKA (*arriba*); CORTESIA DE IBM (*abajo*)/*American Scientist*

de máquinas, así a las lavadoras o a los motores de coche. La experiencia diaria ilustra la amplia repercusión que han tenido la miniaturización y la integración, con el consiguiente abaratamiento de los costes de la electrónica integrada. La vida se ve facilitada por los audífonos y otros implantes que deben su existencia a la microelectrónica. (De hecho, el audífono fue una de las primeras aplicaciones comerciales del transistor, años antes de las computadoras.) Los relojes de pulsera controlados por cuarzo funcionan merced a circuitos compactos que acomodan una frecuencia de un megaciclo, generada por un oscilador electrónico, a los tiempos de respuesta de las pantallas de cristal líquido y de los componentes mecánicos. La sustitución del dinero en metálico por tarjetas de crédito ha sido posible gracias a los circuitos electrónicos que autorizan las transacciones con rapidez. Y no hablemos de lo más evidente: ordenadores portátiles, teléfonos móviles, unidades de GPS o MP3, y dispositivos como los iPhone y similares, que se conectan a Internet de modo inalámbrico.



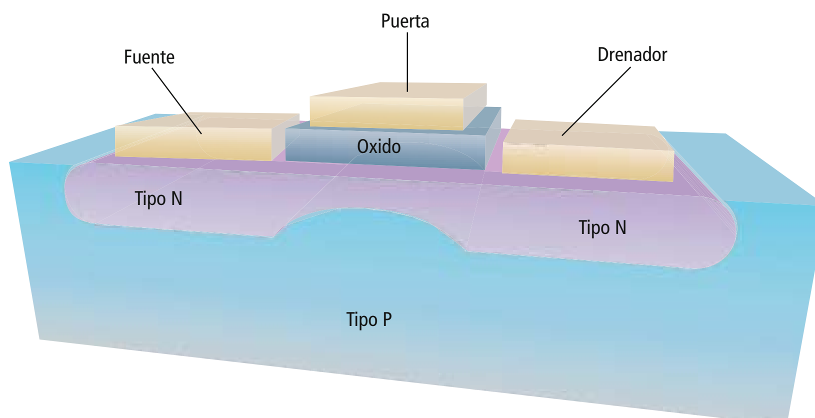
5. EL TRANSISTOR DE UNION BIPOLAR, una de las primeras versiones comerciales del transistor, utiliza material semiconductor con dos tipos de impurezas añadidas para que conduzca electrones (el tipo negativo, o N), o bien "huecos", ausencia de electrones (el tipo positivo, o P). En el caso representado, la corriente enviada a través del electrodo base controla si circulará corriente o no por la sección de tipo N desde el electrodo emisor hasta el electrodo colector.

Alternativas eléctricas

Sin embargo, desde que aparecieron computadores que utilizaban transistores para las funciones de conmutación se ha venido intentando sustituir los transistores por dispositivos con otro fundamento físico. Se sigue buscando un dispositivo mejor, pese al espectacular éxito de los sistemas informáticos transistorizados. Los sistemas alternativos quizás ofrezcan ciertas ventajas, como el aumento de la velocidad de cómputo o una resistencia mayor en entornos adversos, pero todavía no ha podido demostrarse.

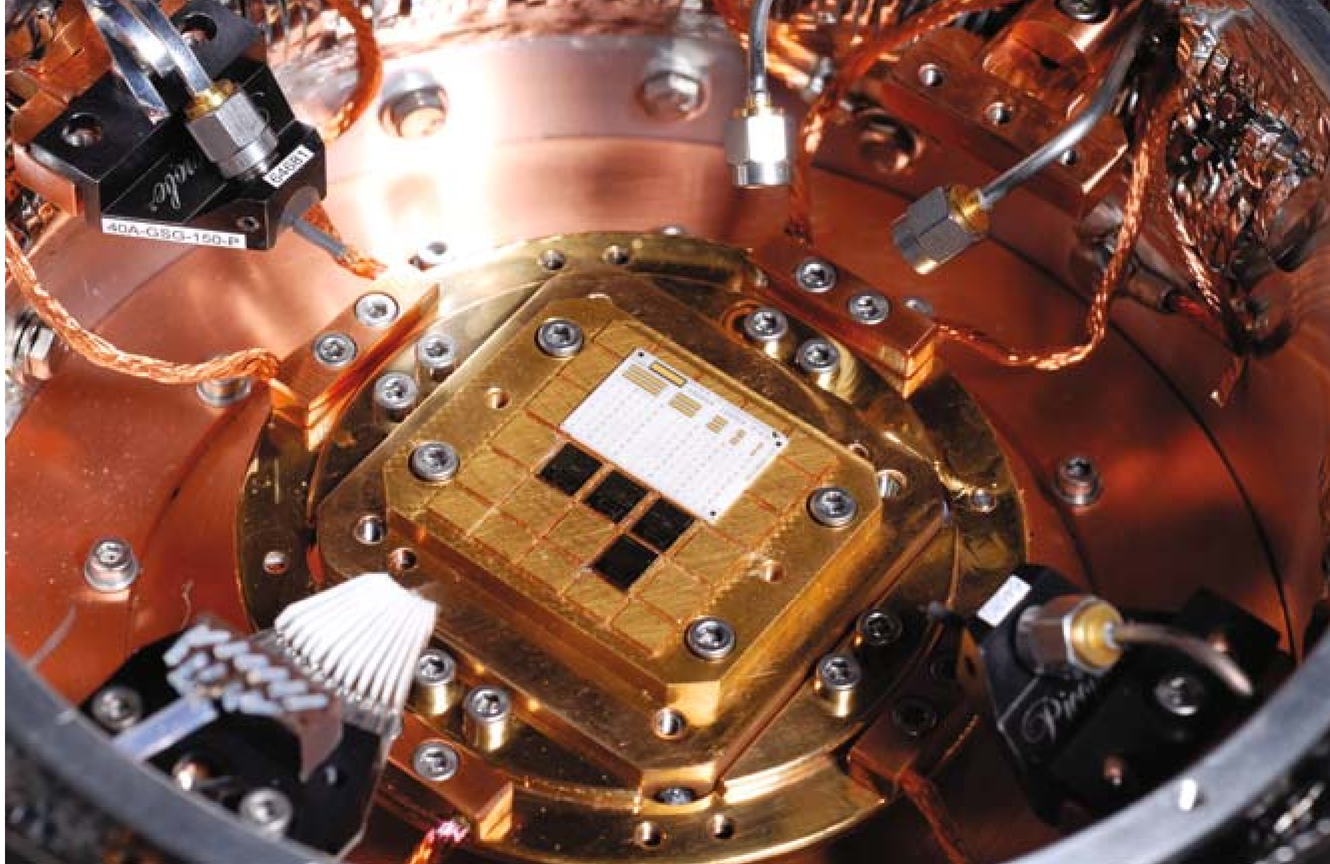
Del diodo túnel, dispositivo semiconductor diez años posterior al transistor, se dijo que podría ejecutar las funciones lógicas con mayor rapidez, dado que funcionaba en altas frecuencias. Esos diodos contienen un alto nivel de dopantes en la unión entre materiales de tipo N y de tipo P, en la que electrones y huecos se alinean a uno y otro lado. Los electrones pasan, por "efecto túnel" —consecuencia de la mecánica cuántica—, a través de esa barrera. El rasgo inhabitual del diodo túnel es su resistencia negativa; al revés de los conductores ordinarios, cuando se le aplica un voltaje hay una región en la cual la corriente disminuye a medida que el voltaje aumenta. Con ese elemento de resistencia negativa no es difícil construir un circuito eléctrico que tenga dos estados estables, es decir, un biestable. Cuando el dispositivo de resistencia negativa se conecta a una batería (u otro generador eléctrico), el circuito puede encontrarse en un estado de bajo voltaje o en uno de alto voltaje. Cualquier estado intermedio será inestable: como una bola que se balancee sobre la hoja de un cuchillo, el circuito caerá de forma espontánea en uno de los estados estables.

Más de una vez se ha sugerido que los dos estados estables creados por un circuito con un elemento de resistencia negativa podrían representar los ceros y los unos a efectos de computación. Para ejecutar operaciones lógicas, los estados de uno o varios circuitos biestables deberían controlar el estado de otro circuito. En el laboratorio se logró que diodos túnel muy pequeños condujesen una corriente que cargaba muy deprisa la capacitancia de otro diodo túnel. Esto llevó a emprender grandes proyectos apoyados por gobiernos y empresas importantes para el desarrollo de computadores basados en circuitos biestables de resistencia negativa: se esperaba conseguir



6. UN TRANSISTOR DE EFECTO CAMPO, el tipo habitual en los ordenadores, utiliza sólo una unión entre materiales semiconductores de tipo N y de tipo P. El electrodo puerta está aislado del semiconductor por una fina barrera de material óxido. La corriente procedente de la puerta crea un canal de conducción, en este caso en el material tipo P, entre el electrodo fuente y el electrodo drenador.

RUSSELL HOUSE/*American Scientist*



7. UNA CAMARA DE FABRICACION EXPERIMENTAL deja ver cómo se graba y deposita material en capas configuradas para componer chips de computador.

CORTESIA DE IBM Y DEL INSTITUTO GEORGIA DE TECNOLOGIA/*American Scientist*

procesadores mucho más rápidos que los basados en transistores.

Sin embargo, a falta de un procedimiento para producir una señal normalizada realmente digital había que intentar el uso de métodos digitales que reprodujeran exactamente la relación corriente-voltaje característica al pasar de un circuito a otro. La precisión requerida era demasiado difícil de conseguir, aunque los diodos túnel fueran pocos; a partir de 1966, se abandonaron las tentativas de utilizarlos en circuitos lógicos. Corrieron la misma suerte proyectos similares basados en otros dispositivos de resistencia negativa.

En el decenio de los setenta se estudió la posibilidad de computar con unos circuitos biestables basados en superconductores, las uniones Josephson. A una temperatura crítica, habitualmente próxima al cero absoluto, los materiales superconductores no ofrecen resistencia a la corriente eléctrica. Las uniones Josephson utilizan dos capas superconductoras con una tercera capa muy fina de material no superconductor emparedada entre aquéllas. Las uniones pueden adquirir dos estados diferentes: un estado superconductor a voltaje cero o un estado resistivo normal. Además, en el estado de la unión puede también influir un campo magnético, que podría ser generado por la corriente en un hilo controlado por otra unión Josephson. Estas interacciones entre corrientes aportaron una considerable flexibilidad al diseño de los circuitos biestables. También en este caso la conmutación resultó ser muy rápida, lo que dio aliento a grandes proyectos de desarrollo; se descubrió además que los dispositivos tenían una especial sensibilidad para detectar débiles niveles eléctricos y magnéticos.

Pero, una vez más, no había la referencia de unas señales digitales patrón, y no se podía lograr un control preciso de las características del dispositivo necesarias para producir una señal normalizada. En los primeros años ochenta, la decepción hizo abandonar el desarrollo de computadores basados en uniones Josephson.

Hace ya decenios que se viene intentado aplicar la mecánica cuántica a la computación. Podrían así abordarse problemas tan arduos como la descomposición en factores primos de números muy grandes, inaccesibles incluso para los ordenadores ordinarios más potentes. Para ello se utilizaría el espín, propiedad intrínseca de los electrones, con su momento magnético asociado. El espín puede tener uno de dos sentidos, “arriba” o “abajo”, y se han desarrollado métodos para “polarizar” los electrones en uno de tales estados. Controlar el espín electrónico requiere, sin embargo, grandes cantidades de energía, y los estados del espín se degradan con el tiempo. Además, no es nada fácil detectar dichos estados.

En los últimos años se ha intentado sustituir los transistores por conmutadores electromecánicos a escala microscópica. Hewlett-Packard ha sometido a ensayo sistemas nanoelectromecánicos realizados también en silicio, aunque diseñados para un movimiento mecánico. Otro experimento, de la Universidad de Cambridge, se vale de nanotubos de carbono, cilindros huecos de carbono de 1 a 2 nanómetros de

El autor

Robert W. Keyes se doctoró en físicas por la Universidad de Chicago. Tras varios años en el Laboratorio de Investigación de Westinghouse en Pittsburgh, pasó al Centro Thomas J. Watson de IBM en Yorktown Heights. Allí se ha dedicado a los materiales para técnicas avanzadas de óptica y electrónica. Actualmente es miembro emérito de la plantilla de investigadores. Ha recibido una distinción de la IBM por ocho patentes y su participación en el desarrollo del láser de inyección.

diámetro y un átomo de espesor, que se desvían a uno y otro lado para cerrar un contacto eléctrico. Estos dispositivos vienen a suponer una vuelta miniaturizada al relé, el conmutador más antiguo del cálculo automático. Habrá que profundizar mucho más semejante batería de proyectos, todavía en sus comienzos, para que pueda intentarse su explotación comercial. Sólo el tiempo dirá si en algo superan a sus antecesores.

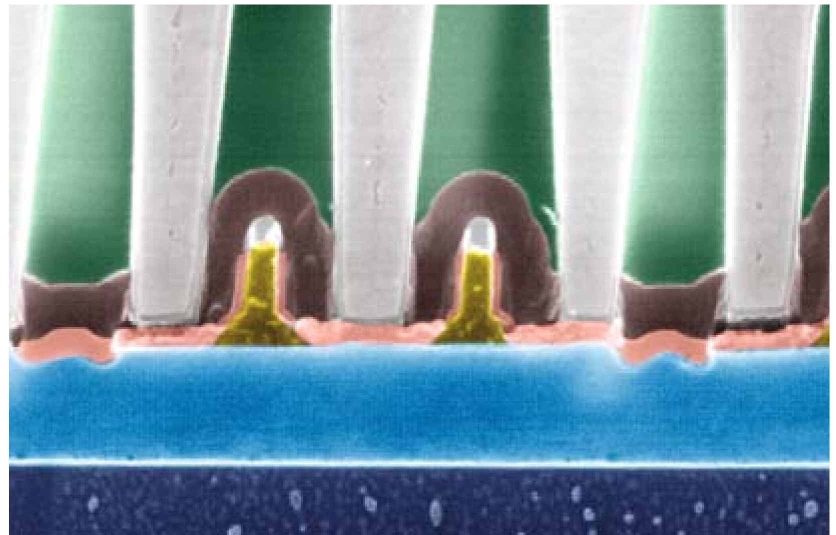
Canalización de la luz

Como ya queda dicho, otra técnica importante y bien fundamentada para conseguir una mayor velocidad lógica de computación se basa en el uso de señales ópticas, en lugar de eléctricas. Diversos laboratorios lo han abordado con distintos enfoques. Algunos se inspiraron en el descubrimiento de la biestabilidad óptica, que permite construir dispositivos con materiales susceptibles de adquirir uno de dos estados, diferenciados por un grado de transparencia distinto. Tal biestabilidad se podría conseguir en un material cuyas propiedades ópticas dependieran de la intensidad de la luz que lo atravesase. Que las propiedades ópticas de los materiales favorables dependan mucho de la temperatura, más la alta precisión a que obligan las dimensiones físicas de los dispositivos, señala la dificultad de la técnica de marras. Tampoco es posible comparar una señal con unos valores de referencia establecidos.

En otro tipo de computación a la que se llamaba "óptica" se utilizaba la interacción entre la luz y un semiconductor para realizar las operaciones lógicas, pero la luz sólo era el vehículo que transportaba las señales de un lugar a otro.

La demostración de AT&T en 1990 dependía de un dispositivo electroóptico difícil de realizar e incapaz de competir con la lógica puramente eléctrica. Otras maneras de aprovechar la luz como parte de un sistema computador también han pretendido el nombre de "computación óptica", pero ninguna ha demostrado ventajas comercialmente viables sobre la computación transistorizada.

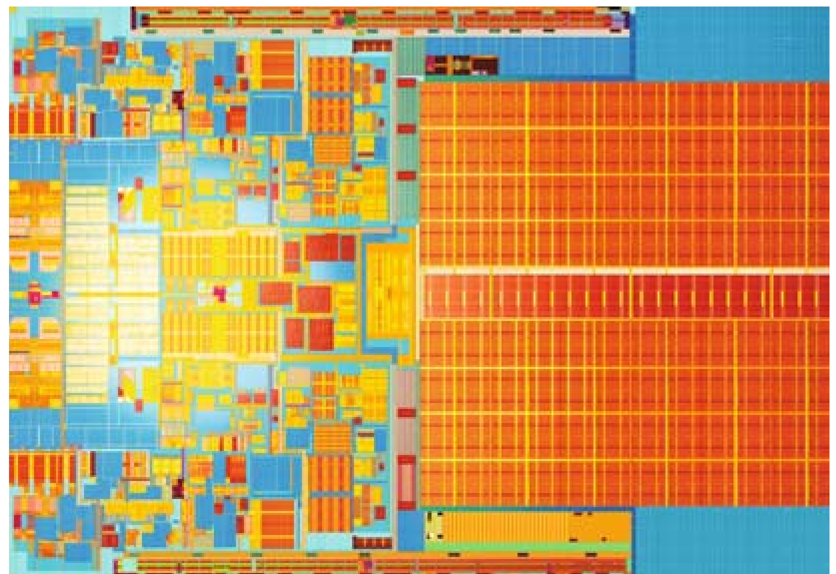
En la computación con relés era esencial separar la señal de conmutación de la señal de salida, de modo que nada relativo al destinatario de la señal enviada por un circuito lógico influyera en el circuito que la producía. En un biestable, sin embargo, la entrada se halla compartida con el terminal de salida. La conexión del dispositivo a su salida puede afectar a su funcionamiento, ya que la señal que el conmutador envía al siguiente circuito lógico está generada por el paso de la diferencia de corrientes entre los estados estables, la cual puede variar notablemente de un dispositivo a otro. El resultado obtenido de un circuito biestable depende de las características del dispositivo en cuestión, no de una señal digital patrón.



8. ESTA FOTOGRAFIA POR MICROSCOPIO DE BARRIDO ELECTRONICO de la sección transversal de un microprocesador IBM POWER6 muestra dos transistores —de color dorado— de los 790 millones contenidos en ese chip, del tamaño de una uña.

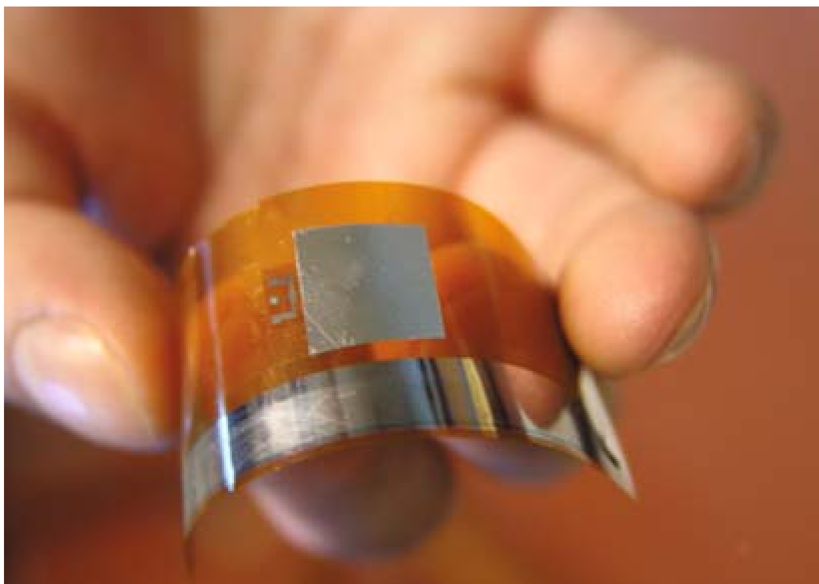
¿Dónde reside el límite?

¿Qué futuro tienen los transistores? La ley de Moore ilustra hoy una sinergia entre el abaratamiento de la potencia de cómputo y las eficaces aplicaciones nuevas que nos ofrece el reducido coste de los circuitos. También suele depositarse en ella la promesa de futuras conquistas de la electrónica. Pero quienes participan en la expansión industrial de los semiconductores llevan tiempo preguntándose si tendencias tan favorables no tendrán un límite. Según Gordon Moore, tres son los factores que contribuyen al sostenido crecimiento del número



9. EL PATRON DE DISEÑO DE UN CHIP DE SILICIO ilustra la complicada red de componentes de estos pequeños dispositivos.

CORTESIA DE IBM (*arriba*); CORTESIA DE INTEL CORPORATION (*abajo*)/*American Scientist*



10. CIERTOS TIPOS DE TRANSISTORES de efecto campo se pueden imprimir en películas flexibles. Estos transistores de película delgada se utilizan ahora en las pantallas de diodos fotoemisores.

CORTESIA DE INGRID GRAZ, *Austrian Science Fund. FWF/American Scientist*

de componentes por chip. Dos de ellos son evidentes: el aumento de tamaño del chip y la miniaturización de los elementos integrados. El tercero, al que podemos llamar ingeniosidad, consiste en modificaciones de diseño; el ahorro de espacio, por ejemplo, apilando componentes en vez de yuxtaponiéndolos.

Las tendencias mencionadas tropiezan con un límite evidente en la miniaturización. Cuanto más pequeño sea un dispositivo, menor será su número de átomos, y no sabemos con certeza el número de átomos que deba tener un dispositivo. Actualmente los chips se graban utilizando luz y materiales fotosensibles, pero la dimensión de los elementos grabados viene limitada por la longitud de onda de la luz. El uso de luz ultravioleta, de longitud de onda extremadamente corta, ha permitido miniaturizar todavía más. Para forzar los límites, se piensa en emplear haces de electrones en vez de haces luminosos, si bien el proceso avanza con exasperante lentitud.

Los arduos problemas que en este momento encara la industria atañen a propiedades más macroscópicas de la materia. Al reducirse de tamaño los dispositivos, se alcanza un punto en el que los electrones traspasan por efecto túnel barreras, cada vez más delgadas, ideadas para impedir el paso de corriente. Para atajar el problema, se buscan barreras más eficaces.

Otra dificultad, ya de índole práctica, es la evacuación del calor producido por la concentración de más dispositivos en un espacio pequeño y por las indeseadas corrientes de efecto túnel. Los microprocesadores de gama alta actuales disipan de 50 a 100 watt en un chip de muy pocos centímetros cuadrados, a razón de 30 a 50 watt por centímetro cuadrado; las placas vitrocerámicas y otras superficies de cocina producen de 3 a 5 watt por centímetro cuadrado. El enfriamiento de los chips está poniendo a prueba las técnicas de transferencia de calor. Sería posible la refrigeración por líquidos, pero complicaría mucho las cosas.

En un programa pueden intervenir millones de operaciones, cada una de ellas realizada en un tiempo finito: la velocidad de procesamiento es, pues, otro aspecto esencial que afecta a la utilidad del sistema. La propia miniaturización mejora la velocidad de funcionamiento; las señales eléctricas tienen que recorrer menos distancia y emplean menos carga para conmutar un dispositivo. El perfeccionamiento de los diseños reduce, asimismo, la cantidad de carga necesaria para accionar un dispositivo y facilita el rápido desplazamiento de las cargas eléctricas.

Ante la importancia de la industria de semiconductores para las economías nacionales, los gobiernos e industrias del mundo han establecido el Plan (*Roadmap*) Tecnológico Internacional para Semiconductores, informe bianual emitido por expertos de cinco países en el que se intenta anticipar futuros avances en este tipo de materiales. Describe las mejoras en materiales y métodos de fabricación que se necesitan para que lo previsto llegue a ser real; orientan sobre las actividades de investigación y desarrollo, y ayudan a los suministradores del utillaje a que se anticipen a las necesidades del sector de los semiconductores. Hablamos de informes que ofrecen una panorámica general de las técnicas emergentes en el campo de los transistores.

El más reciente data de 2007, actualizado en 2008. Resalta la necesidad no sólo de reducir el tamaño de los componentes, como en la ley de Moore, sino también de conseguir mayor eficacia y versatilidad en su fabricación. Se considera preocupación primordial el aprovechamiento de la energía, así como la tendencia a aumentar y mejorar sus prestaciones en un espacio equivalente.

Para alcanzar tales objetivos, importa desarrollar nuevos materiales que sustituyan al silicio y diversificar más las tareas que puedan desempeñar los chips. Un éxito ha sido la impresión de circuitos integrados en finas películas de plástico que después se incorporan a las pantallas de diodos fotoemisores (LED). Otro ejemplo es el primer chip operativo que ha sustituido el silicio por nitruro de galio, presentado por Weixiao Huang, del Instituto Politécnico Rensselear, en 2008. Con este material se componen los LED azules, técnica en la que se apoya el formato de video Blu-ray de alta definición. El nitruro de galio soporta condiciones más extremas por trabajar a temperaturas más elevadas y ser poco sensible a

las radiaciones. Puede, además, operar en las frecuencias de microondas; los chips serían, pues, adecuados para las transmisiones inalámbricas de datos.

Para mucho más tarde, el Plan prevé los transistores que incorporan nanotubos de carbono. Phaedon Avouris y sus colaboradores del Centro de Investigación Thomas J. Watson, de IBM, conciben que estos nanotubos ocupen el lugar de un canal de silicio en los transistores de efecto campo. A medida que se achican los transistores, también lo hacen sus canales, hasta que llega a intervenir el efecto túnel cuántico. Pero el acoplamiento de los nanotubos de carbono, cuya forma les permitiría quedar totalmente envueltos por un electrodo puerta, sería fuerte y controlarían bien. Son buenos conductores y producen los grandes valores del cociente de las corrientes de encendido y apagado que requiere la propagación eficaz de las señales de computación. Subsisten, sin embargo, numerosos problemas. Por ahora, no es fácil producir lotes de nanotubos con propiedades uniformes, entre ellas el diámetro del tubo. Quizá falten algunos años para que la técnica de su fabricación avance hasta poder integrarlos en la producción masiva de transistores.

El único superviviente

El éxito de las válvulas de vacío y los transistores en los computadores se debe a que pueden comportarse como relés. No es casualidad, pues el transistor lo inventó un grupo de los Laboratorios Telefónicos Bell específicamente creado para encontrar un dispositivo de estado sólido que reemplazara los numerosos relés utilizados en la telefonía. En el relé, una señal pequeña controla una señal de gran amplitud en otro circuito, propiedad que en electrónica se llama "ganancia". La elevada ganancia de válvulas y transistores —un cambio pequeño en la entrada produce un cambio grande en la salida— les permite comportarse como conmutadores, transmitir el resultado de una operación lógica por medio de una señal verdaderamente digital obtenida de un conjunto de voltajes normalizados y presentes en todo el computador. La restauración de una señal a su valor digital correcto no depende de una exacta reproducción de la señal de conmutación característica de un dispositivo a otro. Se puede tolerar una variación considerable de la salida de un transistor, sin que ello afecte a su capacidad de restaurar la señal a su valor correcto.

La atracción entre cargas de signo contrario y la repulsión entre cargas del mismo signo posibilitan la ganancia de transistores y válvulas de vacío. En uno y otro caso, una pequeña carga en un elemento controla el movimiento de una carga mucho mayor. Este fenómeno es el único en que se ha estado sustentando la amplificación electrónica desde la aparición de la válvula de vacío, que hace un siglo marcó el inicio de la era electrónica. Un defecto básico de todas las alternativas propuestas para el transistor en la computación es que ninguna ofrece un medio fiable de suministrar la alta ganancia necesaria para la acción conmutadora, es decir, la conexión de una señal lógica a un conjunto de valores normalizados que ejecutan una computación realmente digital.

Durante más de medio siglo, han abundado, y fracasado, los intentos por encontrar técnicas novedosas para los dispositivos de computación. Había métodos que podían funcionar en las condiciones ideales de un laboratorio, pero no aguantaban el entorno hostil de un gran sistema: dispositivos densamente empaquetados para aprovechar la economía de fabricar en grandes series y reducir al mínimo los tiempos de propagación interna de las señales; la calidad de funcionamiento afectada por el calor que desprende esa densa aglomeración, las altas densidades de corriente que han de resistir los dispositivos y los largos años de vida útil prevista. Y, por si fuera poco, las señales que recorren los hilos del computador sufren atenuaciones y distorsiones durante la transmisión y están expuestas a la diafonía inducida por los hilos cercanos.

Contando con semejante gavilla de imperfecciones, los circuitos lógicos deben adoptar decisiones binarias fiables en cuanto al significado de las señales que reciban de otros dispositivos. Su cometido es procesar señales y enviar información sin poder contar con una retroalimentación. Evitar el deterioro y la pérdida de señales en tales condiciones sólo se ha conseguido merced a la transmisión digital: normalizar los niveles de señal a través de todo un sistema y reiniciar las señales con el valor digital correcto en cada etapa. La reiniciación se consigue mediante la conexión a dispositivos terminales de alta ganancia que puedan actuar como conmutadores: los transistores.

El defecto predominante en los novedosos dispositivos planteados como alternativa es que carecen de la ganancia necesaria para establecer las conexiones que restituyen las señales a su valor de referencia. Como dispositivo de estado sólido que proporciona alta ganancia, el transistor es único y desempeña un papel esencial en la electrónica informática. Desde sus principios ha cambiado mucho en dimensiones, material y métodos de fabricación, y seguirá evolucionando al compás de los tiempos, pero no va a encontrar pronto sustituto.

Bibliografía complementaria

FUTURO DEL TRANSISTOR. Robert W. Keyes en *Investigación y Ciencia*, págs. 44-49; agosto, 1993.

CRYSTAL FIRE. M. Riordan y L. Hoddeson. W. W. Norton; Nueva York, 1997.

THE CLOUDY CRYSTAL BALL. R. W. Keyes en *Philosophical Magazine B*, vol. 81, págs. 1315-1330; 2001.

PHYSICAL LIMITS OF SILICON TRANSISTORS AND CIRCUITS. R. W. Keyes en *Reports on Progress in Physics*, vol. 68, págs. 2702-2746; 2005.

ORIGEN del fondo submarino

Las profundas cuencas oceánicas están tapizadas por lava solidificada procedente de volcanes submarinos. Empieza a comprenderse el modo en que toda esa lava alcanza el lecho oceánico

Peter B. Kelemen

En las oscuras y frías profundidades oceánicas se producen, apenas advertidas, el 85 por ciento de las erupciones volcánicas de la Tierra. Aunque oculto, el fenómeno reviste suma importancia: los volcanes submarinos generan los sólidos contrafuertes de los océanos del planeta, placas de roca de siete kilómetros de espesor.

A principios del decenio de los sesenta, la geofísica empezó a plantearse el ardiente origen del fondo marino, la corteza oceánica. Los sonares revelaron que los volcanes submarinos formaban cadenas montañosas, sin solución de continuidad casi, a lo largo de todo el globo, distribuidas cual costuras de una pelota de béisbol. Más tarde, los esfuerzos se centraron en explicar qué era lo que alimentaba esas cadenas de montañas eruptivas o dorsales oceánicas. Las teorías principales sugerían que, dado que la corteza oceánica se alejaba de las dorsales, el material caliente del interior rocoso de la Tierra debía ascender para rellenar el vacío resultante. Sin embargo, el origen exacto de la lava y el modo en que ésta viaja hasta la superficie han sido un misterio durante largo tiempo.

En los últimos años, los modelos matemáticos de la interacción entre la roca fundida y la sólida han aportado respuestas; también nos hemos beneficiado con el estudio de los fragmentos de fondo marino antiguo que se hallan ahora en los continentes. Estas investigaciones han permitido desarrollar una teoría que explica con detalle el nacimiento de la corteza oceánica. El proceso difiere de la idea más extendida y popular, según la cual el magma ocupa primero una enorme cámara bajo un volcán y asciende luego a través de una fractura irregular. El fenómeno empieza a una profundidad de docenas de kilómetros bajo la corteza oceánica, donde minúsculas gotas de roca fundida fluyen a través de poros microscópicos a un ritmo de 10 centímetros anuales (velocidad similar a la del crecimiento de las uñas). Cerca de la superficie, el proceso se acelera; culmina con enormes flujos de lava sobre el fondo marino circulando a la velocidad de un camión.

La determinación del movimiento del líquido a través de la roca sólida profunda no sólo explica el modo en que emerge la corteza oceánica, también permite elucidar el comportamiento de otras redes de transporte de fluidos, incluidos los sistemas fluviales que recorren la superficie del planeta.

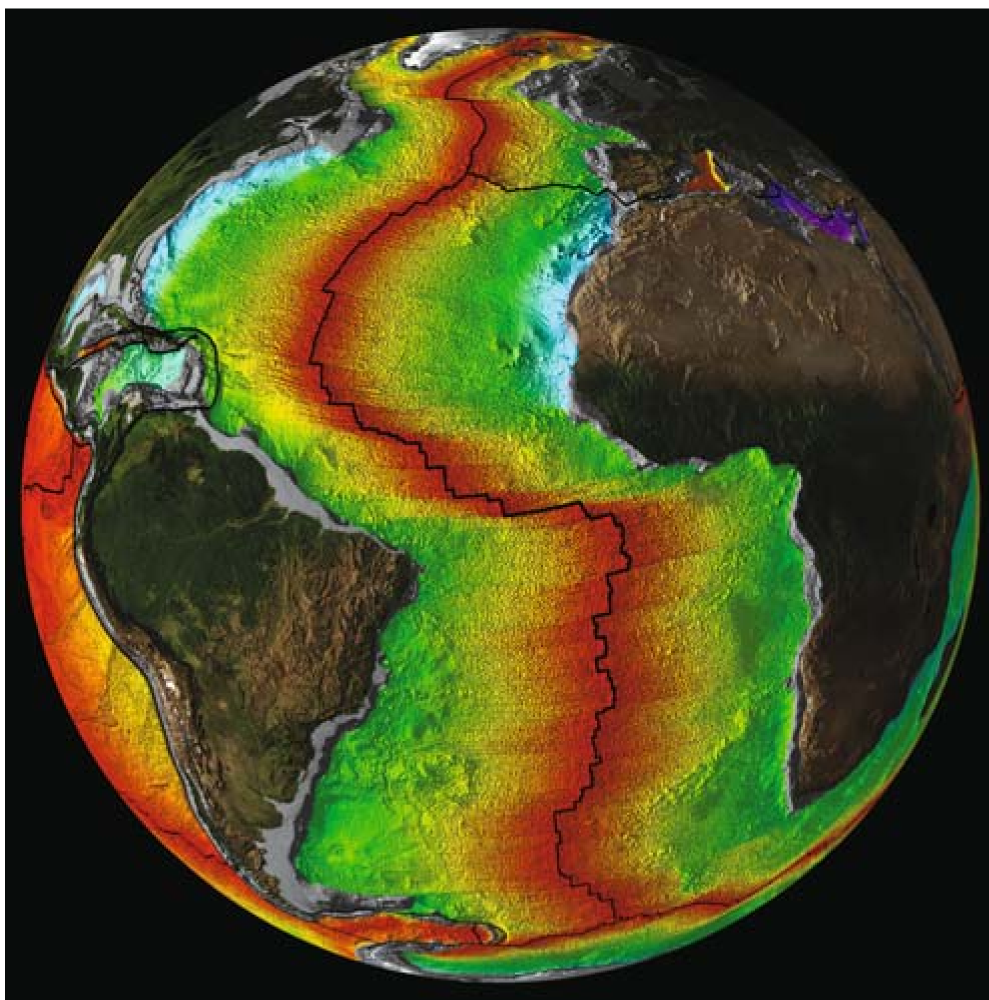
En las profundidades

Muy por debajo de los volcanes de las dorsales oceánicas y de las innumerables capas de lava que forman la corteza, se encuentra el manto: una capa de 3200 kilómetros de espesor de roca abrasadora que forma la sección central de la Tierra y rodea su núcleo metálico. En la fría superficie terrestre, las rocas del manto impulsadas hacia ella son de color verde oscuro, pero si pudiéramos observarlas en su lugar de origen, serían de un rojo vivo o quizá rojo blanco. La parte superior del manto se encuentra a 1300 grados Celsius; aumenta alrededor de un grado por cada kilómetro de profundidad. Debido al peso de la roca suprayacente, la presión aumenta con la profundidad unas 1000 atmósferas por cada 3 kilómetros.

El descubrimiento de las altas presiones y temperaturas del manto llevó a los expertos a proponer, a finales del decenio de los sesenta, que la corteza oceánica se originaba

CONCEPTOS BASICOS

- El 85 por ciento de las erupciones volcánicas se dan en las profundas aguas oceánicas a lo largo de las dorsales mesoceánicas.
- La lava emitida por estas estrechas cadenas volcánicas del fondo marino genera los contrafuertes rocosos de todos los océanos.
- Hasta hace poco, se desconocía el mecanismo mediante el cual la lava ascendía y llegaba a las dorsales.
- Los expertos creen que el proceso se inicia con la formación de gotículas de roca líquida en regiones de profundidades superiores a los 150 kilómetros.



1. LA DORSAL MESOATLANTICA, una cadena volcánica de 10.000 kilómetros de longitud bajo el océano Atlántico, constituye la cadena montañosa más extensa del planeta. Los colores indican la edad de la corteza oceánica: joven (*rojo*) cerca de la dorsal y más vieja conforme se aproxima a los continentes.

ELLIOT LIM Y JESSE VARNER *CIRES, Universidad de Colorado en Boulder, y NOAA/National Geophysical Data Center (www.ngdc.noaa.gov/mgg)*; FUENTE DE LOS DATOS: "AGE, SPREADING RATES AND SPREADING SYMMETRY OF THE WORLD'S OCEAN CRUST", POR R. DIETMAR MÜLLER ET AL., EN *GEOCHEMISTRY, GEOPHYSICS, GEOSYSTEMS*, VOL. 9, Q04006; 2008 (DOI:10.1029/2007GC001743)

en pequeñísimas cantidades de roca líquida (magma), que resultaban de una suerte de "transpiración" de la roca sólida. Basta una minúscula liberación de presión (en virtud del ascenso de material desde su posición original) para provocar la formación de magma en los poros microscópicos de la profunda roca del manto.

La explicación del modo en que la roca alcanza la superficie resultó algo más difícil. El magma es menos denso que las rocas del manto en las que se forma, por lo que su tendencia es migrar hacia arriba a través de regiones donde la presión es menor. Sin embargo, la composición química del magma no parecía coincidir con la composición de las muestras obtenidas de las dorsales mesoceánicas, allí donde el magma emanado se endurece.

Con dispositivos especiales para calentar y presionar, en el laboratorio, cristales procedentes de rocas del manto, los investigadores se percataron de que la composición del magma en el manto variaba en función de la profundidad a la que se formaba. La composición está controlada por el intercambio de átomos entre el magma y los minerales que componen la roca sólida que el magma atraviesa. Los experimentos demostraron que el magma, en su ascenso, disuelve un tipo de mineral, el piroxeno, y precipita, o deja atrás, otro, la olivina. Por tanto, cuanto más arriba del manto se forma el magma, mayor cantidad de piroxeno disuelve y más olivina deja atrás. La comparación de esos hallazgos empíricos con muestras de lava de las dorsales mesoceánicas mostró que la mayoría tenía la composición de los magmas formados a profundidades superiores a los 45 kilómetros.

Esta conclusión avivó un intenso debate: ¿Cómo es posible que el magma ascienda decenas de kilómetros a través de la roca suprayacente preservando una composición propia de una profundidad mayor? Si, tal y como se sospechaba, el magma ascendía lentamente por los intersticios de la roca, cabía esperar que todos los magmas reflejaran la composición de la parte del manto más próxima a la superficie, a 10 kilómetros de profundidad o menos. Sin embargo, la composición de la mayoría de las muestras de las dorsales mesoceánicas sugería que el magma del que procedían había viajado a través de 45 kilómetros del manto superior

GLOSARIO GEOLOGICO

DUNITA: Roca constituida casi en su totalidad por mineral de olivina. Forma en el manto superior unas redes de vetas de color claro características.

FLUJO INTERSTICIAL CONCENTRADO: Proceso mediante el cual el magma suele viajar a través de las rocas sólidas del interior de la Tierra. El magma fluye por intersticios alargados entre cristales microscópicos, a la manera del agua a través de la arena.

LAVA: Roca fundida emitida sobre la superficie terrestre durante una erupción volcánica.

MAGMA: Roca fundida antes de ser emitida por una erupción.

DORSALES MESOCEANICAS: Cadenas montañosas submarinas que generan, mediante erupciones volcánicas, corteza oceánica nueva.

MINERALES: Componentes de las rocas. Pueden estar constituidos por un solo elemento (como el oro) o por varios. La olivina, por ejemplo, consta de magnesio, silicio y oxígeno.

OFIOLITA: Sección de la corteza oceánica y de las rocas del manto subyacente que ha alcanzado la superficie continental durante la colisión de placas tectónicas.

TRANSPIRACION DEL FONDO MARINO

Los sólidos cimientos de las cuencas oceánicas terrestres consisten en franjas de roca volcánica de siete kilómetros de espesor. Esta corteza oceánica se origina en diminutas gotas que se forman a lo largo de extensas regiones del interior sólido del planeta (manto), como si las rocas sudaran. Mediante un proceso de flujo intersticial concentrado, esas gotículas innumerables ascienden y emergen a lo largo de las dorsales mesoceánicas. Conforme asciende el nuevo material, la corteza más antigua se aleja de las dorsales (*flechas*).



3 LENTO FLUIR DEL MAGMA: El magma asciende tan sólo unos centímetros al año porque los canales de disolución se obstruyen con los granos de roca que el magma no disuelve. De una manera gradual, los millones de hilillos de magma se concentran en conductos mayores.

4 BARRERAS QUE OBSTRUYEN EL FLUJO: En el frío manto superior, parte del magma ascendente pierde suficiente calor para cristalizar, formando sólidas barreras. Cuanto más alejadas se hallan de la dorsal, a mayor profundidad surgen esas barreras cristalinas, por lo que guían el magma restante hasta la dorsal.

5 FRACTURAS ABIERTAS: Bajo las dorsales mesoceánicas, el magma cristalizado obstruye el flujo ascendente. El magma se acumula en cámaras lenticulares hasta que la presión en su interior aumenta lo suficiente para romper las rocas más frías suprayacentes.

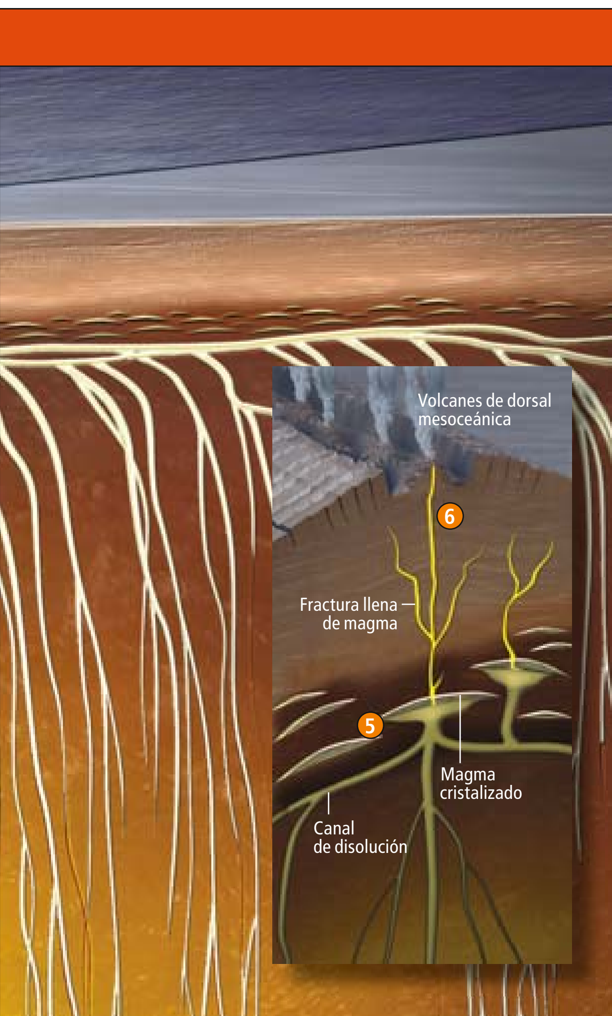
sin disolver piroxeno de la roca circundante. Pero, ¿de qué modo?

¿Fracturación bajo presión?

A principios del decenio de los setenta, los científicos avanzaron una respuesta que no se alejaba de la visión más extendida: el magma debía realizar el último tramo de su ascenso a través de grandísimas fracturas. Las fracturas abiertas habrían permitido un ascenso tan rápido, que el magma no habría tenido tiempo de interactuar con la roca entorno; el magma del centro de la fractura ni siquiera habría entrado en contacto con las paredes. Aunque las fracturas abiertas no constituyen un elemento propio del manto superior —la presión es demasiado elevada—, algunos investigadores sugerían que la tendencia a flotar del magma en movimiento podría, en ocasiones, ser lo bastante fuerte para romper la roca sólida suprayacente, como un rompehielos que fuerza su paso a través de los bancos de hielo.

Adolphe Nicolas y su equipo, de la Universidad de Montpellier, hallaron una prueba de interés mientras examinaban ofiolitas, insólitas formaciones rocosas. Cuando la corteza oceánica envejece y se enfría, se torna tan densa, que se hunde en el manto a lo largo de fosas profundas (zonas de subducción), como la que rodea el océano Pacífico. Las ofiolitas corresponden a gruesas secciones de fondo marino antiguo y manto subyacente, que son empujadas hacia arriba hasta los continentes cuando colisionan dos placas tectónicas. En el sultanato de Omán se halla un ejemplo famoso de ofiolitas, que quedaron expuestas durante la aún activa colisión de las placas arábiga y euroasiática. En esta y otras ofiolitas, el equipo de Nicolas halló vetas de color claro

KEVIN HAND



6 **FLUJO RAPIDO DEL MAGMA:** Las fracturas abiertas permiten al magma escapar con celeridad hacia arriba, vaciando la cámara inferior. Parte del magma es emitido en forma de erupción de lava hacia la cima de la dorsal, pero la mayor parte del mismo cristaliza en el interior de la corteza.

(diques) rarísimas; dedujeron que correspondían a fracturas ocupadas por magma que cristalizó antes de alcanzar la superficie del fondo marino.

El problema de esta hipótesis radica en que los diques están ocupados por roca que cristalizó de un magma formado en los tramos del manto superior, no por debajo de los 45 kilómetros, donde se origina la lava de las dorsales mesoceánicas. Además, el panorama del rompehielos podría no encajar con la región magmática bajo las dorsales mesoceánicas: por debajo de los 10 kilómetros de profundidad, el manto tiende a fluir como caramelo líquido, más que romperse con facilidad.

Un río intersticial

Para explicar ese misterio, empecé a trabajar en una hipótesis alternativa del transporte de lava en la región magmática. En mi tesis doctoral, que presenté a finales de los años ochenta, desarrollé una teoría química: a medida que el magma asciende, disuelve cristales de piroxeno y precipita una cantidad menor de olivina, por lo que el resultado neto de la transformación es un mayor volumen de magma. En el decenio de los noventa, junto a Jack Whitehead, de la Institución Oceanográfica de Woods Hole, Einar Aharon, hoy en el Instituto Weizmann de Ciencia de Rehovot, y Marc Spiegelman, del Observatorio de la Tierra Lamont Doherty de la Universidad de Columbia, elaboramos un modelo matemático del proceso.

Los cálculos revelaron el modo en que este mecanismo de disolución amplía, de forma gradual, los espacios abiertos en los márgenes de los cristales, formando poros de mayor tamaño y excavando caminos que facilitan el flujo del magma.

A medida que los poros crecen, se conectan entre sí y forman canales alargados. A su vez, respuestas similares determinan la coalescencia de pequeños canales tributarios para formar canales de mayor tamaño. Nuestros modelos numéricos sugerían que más del 90 por ciento del magma se concentraba en menos del 10 por ciento del área disponible. Ello implicaba que millones de hilillos microscópicos de magma en movimiento podían llegar a desembocar en unas pocas docenas de canales de alta porosidad, de una extensión de 100 o más metros.

Incluso en los canales más anchos, se mantienen intactos muchos cristales de la roca del manto original, de modo que obstruyen el canal e impiden el movimiento del fluido. Esta es la causa por la que el magma fluye tan despacio, a un ritmo anual de escasos centímetros. Con el tiempo, sin embargo, llega a circular por los canales tal cantidad de magma, que todos los cristales solubles de piroxeno se disuelven, quedando sólo cristales de olivina y otros minerales que el magma no puede disolver. La composición del magma en los canales no se corresponde, por tanto, con la disminución de presión, sino que registra la profundidad a la que se hallaba el último cristal de piroxeno.

Uno de los resultados más importantes de este flujo intersticial concentrado es que sólo el magma de los márgenes de los canales llega a disolver el piroxeno presente en las rocas adyacentes; el magma más interno del conducto asciende inalterado. Los modelos matemáticos apoyaron, pues, la idea de que el magma formado en el manto más profundo creaba su propio camino de ascenso, no por la fractura de la roca, sino mediante la disolución de parte de la misma. Trabajos de campo complementarios nos han proporcio-

EN CIFRAS

- Se necesita una media de 100 años para generar una franja de corteza oceánica de 6 metros de ancho y 7 kilómetros de espesor.
- La roca caliente del manto terrestre se compone de cristales sólidos; sin embargo, lo mismo que el glaciar formado por cristales de hielo, fluye y asciende hasta 10 centímetros al año (ritmo similar al del crecimiento de las uñas).
- Las erupciones de lava en las dorsales mesoceánicas fluyen por el fondo marino a velocidades que en ocasiones superan los 100 kilómetros por hora.

FORMACION DE DORSALES MESOCEANICAS

A veces, los océanos nacen en tierras áridas, donde los esfuerzos tectónicos separan la tierra en un proceso de rifting continental. Un penacho ascendente de rocas calientes del manto rompe y adelgaza desde abajo el continente. Este segmento adelgazado de corteza continental constituye un valle de rift en el que se dan a menudo erupciones de lava basáltica, del mismo tipo que la que forma corteza oceánica. A medida que se separan ambos lados de la cadena montañosa, el valle se hunde bajo el nivel del mar. Una vez bajo el agua, los volcanes del valle del rift original se convierten en una dorsal oceánica, donde se genera corteza oceánica nueva entre las dos partes del antiguo continente.

Redes fluviales y magmáticas



El agua que circula sobre una playa excava una red de canales semejante a la que la roca fundida (magma) forma en su ascenso por el interior sólido de la Tierra. Aunque estos patrones de formación de canales se desarrollan por distintas causas (el agua de la playa impulsa los granos de arena y los mueve, mientras que el magma disuelve parte de la roca circundante), su parecido sugiere que se hallan gobernadas por leyes físicas semejantes.

En ambos casos, de condiciones iniciales aleatorias surgen pautas regulares. En la playa, el agua del suelo que llega a la superficie durante la marea baja fluye rápidamente hacia puntos bajos. Este agua transporta granos de arena; a medida que fluye, excava canales progresivamente más profundos, que, a su vez, reenvían el agua adicional que entra en ellos (*a*). Debido a este mecanismo de realimentación, los canales separados de forma regular se concentran y fluyen hacia abajo (*b*), aunque procedan de puntos aleatorios. Como los arroyos que alimentan un gran río, esta pauta de erosión se da porque es el mejor modo de conservar la energía del sistema: el canal de mayor profundidad y extensión es el que pierde menos energía por la fricción entre el agua y la arena.

La conservación de la energía constituye otro de los factores clave que determinan la erosión química en el manto terrestre. Conforme el magma disuelve la roca que lo rodea, amplía de forma gradual los espacios minúsculos, o intersticios, por donde fluye. Estos canales de disolución crecen y se concentran a medida que el magma asciende porque el arrastre viscoso, análogo a la fricción, disminuye cuando los intersticios aumentan su tamaño. Lo mismo que en la playa, numerosos canales de tamaño reducido alimentan unos pocos mayores, una pauta que explica en parte por qué las erupciones submarinas suelen concentrarse en las dorsales mesoceánicas y no se distribuyen de manera aleatoria por el fondo marino.

Las condiciones cambiantes fuerzan a los canales a dividirse. En la playa, el agua abandona su carga de arena cuando se suaviza la pendiente; se forman entonces barreras que esparcen el agua y la alejan del canal principal (*c*). Como en un delta, donde el río se encuentra con el mar, el agua se acumula detrás de las obstrucciones; con cadencia periódica, se desborda y excava nuevos canales, que a su vez se obstruirán y quedarán abandonados. Una divergencia similar se da en el manto superior, más frío que la roca subyacente. Allí, el magma no puede mantenerse totalmente fundido; parte del mismo cristaliza. Sin embargo, el magma escapa de forma periódica atravesando las sólidas barreras cristalinas (en ocasiones crea un nuevo conducto hasta el fondo marino).

PETER B. KELEMEN

nado más pruebas directas del flujo intersticial en las ofiolitas.

Tendencia a la concentración

Para observar en amplitud la ofiolita de Omán, hemos de situarnos en el aire. La formación constituye una banda bastante continua de roca de unos 500 kilómetros de longitud y 100 de ancho. Como en todas las ofiolitas, la parte del manto adquiere un color marrón óxido, llamativamente atravesado por miles de vetas de roca parduzca. Se sabe desde hace tiempo que esas vetas corresponden a dunita. No se había estudiado su composición mineral ni la composición de las rocas circundantes.

Tal y como se esperaría de unas rocas que una vez formaron parte del manto superior, la roca adyacente abunda en olivina y piroxeno. La dunita, en cambio, es en más de un 95 por ciento olivina (el mineral dejado atrás conforme el magma asciende por el manto). Además, la dunita carece de piroxeno, lo que encaja con la teoría química que predice que todo el piroxeno se habría disuelto mientras el magma alcanzaba el manto superior. Por este y otros datos, parecía evidente que las vetas de dunita correspondían a los conductos que transportaron el magma profundo hasta el manto superficial bajo las dorsales mesoceánicas. Estábamos contemplando una imagen congelada de antiguos canales de disolución.

Pero, por muy emocionantes que resultaran esos hallazgos, no explicaban el segundo misterio que durante largo tiempo había dejado perplejos a los geofísicos. Los enormes flujos de lava de las dorsales emergen de una zona de cinco kilómetros de extensión. Sin embargo, los sensores sísmicos, que distinguen la roca sólida de la parcialmente fundida, revelan que el magma existe en una región de al menos 100 kilómetros de profundidad y centenares de kilómetros de extensión. ¿De qué modo se canaliza la lava ascendente en una región volcánica tan estrecha del fondo marino?

En 1991, David Sparks y Mark Parmentier, ambos en la Universidad de Brown, dieron una respuesta basada en la temperatura variable de la corteza oceánica y del manto superior. Las erupciones de lava añaden constantemente material sobre las placas de litosfera oceánica a ambos lados de las dorsales mesoceánicas. A medida que las partes más antiguas de las placas se van alejando de la dorsal, dejando paso a lava nueva y ardiente, se enfrían de forma gradual. Cuanto más se enfría la corteza, más densa se vuelve y más se hunde en el manto. Este enfriamiento implica que, en mar abierto, lejos de la cresta de una dorsal,

el fondo marino y su base de corteza oceánica se hallan a unos dos kilómetros más de profundidad media que el fondo y la corteza directamente subyacentes bajo la dorsal.

A partir de esta relación, Sparks y Parmentier desarrollaron un modelo informático del flujo intersticial en el manto. Las simulaciones mostraron que parte del magma ascendente perdía calor suficiente para cristalizar en el manto superior y formar así un dique o techo. Cuanto más alejadas se encuentran de las abrasadoras dorsales, a mayor profundidad se generan esas barreras. En consecuencia, conforme el magma restante asciende, se ve forzado a hacerlo siguiendo el ángulo del techo, hasta alcanzar la dorsal.

Ultimas erupciones

El trabajo de campo y los modelos teóricos arrojaron luz sobre dos grandes misterios. El magma ascendente no alcanza el equilibrio en la composición química con las rocas adyacentes del manto, porque se halla químicamente aislado en los conductos de dunita. Estos conductos se dirigen hacia las dorsales mesoceánicas a medida que el magma se enfría y cristaliza en el manto.

Pero no tardó en plantearse una nueva cuestión: si el ascenso de magma constituye un proceso continuo, gradual, ¿qué es lo que desencadena las periódicas erupciones de roca fundida de los volcanes submarinos?

De nuevo, el trabajo de campo guió nuestras teorías. En la ofiolita de Omán, Nicolas y su compañero de Montpellier Françoise Boudier, revelaron, a mediados del decenio de los noventa, que el magma se acumula en cámaras lenticulares (de pocos metros a centenares de metros de extensión) en el manto más superficial, justo bajo la base de la corteza oceánica. Para explicar los procesos físicos implicados, hubo que tener en cuenta el comportamiento de las rocas bajo la base de la corteza, distinto del que muestran a mayor profundidad.

Bajo una dorsal en expansión activa, como la del Pacífico oriental o la que formó la ofiolita de Omán, las rocas de la parte superior del manto (la parte del manto que se encuentra dentro de los 2000 metros de la base de la corteza) liberan calor hacia el fondo submarino suprayacente, frío. En consecuencia, algunos magmas se enfrían y cristalizan. Con la afluencia constante de magma, éste empieza a acumularse en los espacios lenticulares bajo el material cristalizado. Conforme llega más magma, aumenta la presión en las cámaras. A mayor profundidad, las rocas se hallarían a una temperatura suficiente para fluir en respuesta a la presión; sin embargo, más cerca de la superficie, la pérdida de calor hacia el fondo submarino suprayacente endurece demasiado las rocas. Debido al incremento de presión, las rocas sobre las cámaras de magma se rompen periódicamente y crean conductos que lo llevan hacia la corteza suprayacente, joven. Parte del magma se acumula y enfría cerca de la base de la corteza, de modo que origina nuevas rocas sin provocar una erupción. En otras ocasiones, el magma recorre su camino entero hasta la boca del volcán, con la emisión consiguiente de flujos de lava de más de 10 metros de espesor y 100 kilómetros de extensión que cubren el fondo marino de roca volcánica.

Redes fluviales

Las redes de transporte de magma bajo el fondo marino guardan una estrecha semejanza con los sistemas fluviales que surcan la superficie de la Tierra. Al igual que la fuerza ejercida por pequeñas corrientes de agua que se concentran para formar los ríos, la erosión química en el manto profundo crea, por coalescencia, una red de numerosos y pequeños canales tributarios que alimentan un número reducido de conductos de mayor tamaño.

El magma que cristaliza en el manto superior forma diques naturales que redirigen su flujo a la manera en que un río deposita sedimentos y genera cordones conforme desemboca en el mar. En los dos casos, se abren de modo periódico brechas en los diques, que permiten el paso de fuertes corrientes a lo largo de un solo conducto. La investigación de los procesos físicos que gobiernan el transporte en las redes fluviales y magmáticas podría forjar, en última instancia, una sola teoría fundamental que explicara el comportamiento de ambas.



BRADLEY R. HACKER

2. CORTEZA OCEANICA ORIGINAL y parte del manto subyacente quedan expuestos a las inclemencias de la región árida del sultanato de Omán. Llamada ofiolita, esta enorme formación de roca, curtida ahora en montes riscosos, fue impulsada hacia el continente durante la colisión, activa, de dos placas tectónicas.

El autor

Peter B. Kelemen ocupa la cátedra Arthur D. Storke en el Observatorio de la Tierra Lamont Doherty de la Universidad de Columbia. En 1980, mientras se hallaba cartografiando las ofiolitas del Himalaya, observó el desplazamiento del magma a través del interior rocoso de la Tierra. Desde entonces, ha investigado la interacción entre la roca sólida y la fundida. Combina el trabajo de campo con los modelos químicos teóricos y la investigación en dinámica de fluidos.

Bibliografía complementaria

EXTRACTION OF MID-OCEAN RIDGE BASALT FROM UPWELLING MANTLE BY FOCUSED FLOW OF MELT IN DUNITE CHANNELS. Peter B. Kelemen, Nobumichi Shimizu y Vincent J. M. Salters en *Nature*, vol. 375, págs. 747-753; 29 de junio, 1995.

CAUSES AND CONSEQUENCES OF FLOW ORGANIZATION DURING MELT TRANSPORT: THE REACTION INFILTRATION INSTABILITY. Marc W. Spiegelman, Peter B. Kelemen y Einat Aharonov en *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, n.º B2, págs. 2061-2077; 2001.

DUNITE DISTRIBUTION IN THE OMAN OPHIOLITE: IMPLICATIONS FOR MELT FLUX TROUGH POROUS DUNITE CONDUITS. Michael G. Braun y Peter B. Kelemen en *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, vol. 3, n.º 11, 6 noviembre, 2002.

ENERGIAS DE FUENTES RENOVA











BLES

La necesidad de afrontar el cambio climático y de asegurar el aprovisionamiento energético torna crucial la búsqueda de sustitutos para los combustibles fósiles

MATTHEW L. WALD

Ilustraciones de Don Foley

Las energías renovables, como la electricidad fotovoltaica o los biocombustibles, no proveen, hoy por hoy, ni un 7 por ciento del consumo energético estadounidense. Descontada la energía hidroeléctrica, este porcentaje no llega al 4,5 por ciento. En términos mundiales, las fuentes renovables proporcionan un exiguo 3,5 por ciento de la electricidad y menos todavía de los combustibles para transporte.

En EE.UU., la elevación de ese porcentaje —necesaria para gestionar los gases de efecto invernadero, el déficit comercial y la dependencia de proveedores foráneos— entraña, cuando menos, tres problemas complejos. El más evidente: capturar de forma económica la energía eólica, solar y de los cultivos. Logrado esto, debe trasladarse la energía desde los lugares donde resulta fácil recogerla (el soleado sudoeste o los ventosos Grandes Llanos) hasta los puntos de consumo. Está, por último, su conversión en formas utilizables. Dentro de la última categoría debe señalarse la carga de energía eléctrica en automóviles y camiones, tal vez en baterías o convertida en hidrógeno.

En algunos aspectos se avanza al galope. Según un estudio reciente, patrocinado por Naciones Unidas, en 2007 la inversión mundial en energías renovables fue de 148.400 millones de dólares (unos 119.000 millones de euros), un 60 por ciento más que en 2006. Se están integrando en la red eléctrica nuevos parques eólicos y fotovoltaicos, una infraestructura paralela a la de centrales térmicas de carbón, que presta servicio más horas cada año, a la vez que se multiplica el número de aquéllos.

A pesar de que el precio de la energía solar y, sobre todo, de la energía eólica, ha caído fuertemente en los últimos años, estas fuentes de energía resultan competitivas sólo si se subvencionan o se imponen por ley. En EE.UU., el precio de la electricidad para uso doméstico es, en promedio, de unos 0,09 euros por kWh (kilowatt-hora) para energía producida por una combinación de centrales de carbón, gas natural, nucleares e hidroeléctricas. La producida por fuentes renovables cuesta mucho más. Como es obvio, los gobiernos actúan sobre todas las formas de producción energética con una política de bonificaciones y gravámenes, sea para dar trabajo a los mineros o para demostrar que la escisión del átomo sirve para algo más que la fabricación de bombas. Pero, en muchos casos, a las energías renovables se les concede algo mucho mejor: cuotas. Una subida de precios en los combustibles tradicionales les vendría muy bien, porque el mercado aproximaría los costes a los de las energías renovables.

También les ayudaría un canon sobre el carbono; un impuesto de 8 euros por tonelada de dióxido de carbono emitida elevaría en 0,8 céntimos el coste del kWh de las centrales de carbón. Pero la escala que requiere la transformación es inmensa: la electricidad generada por carbón es, en contenido energético, unas 70 veces mayor que la de generación eólica. Las cifras correspondientes a las térmicas de fuel-oil o de gas natural son igual de impresionantes.

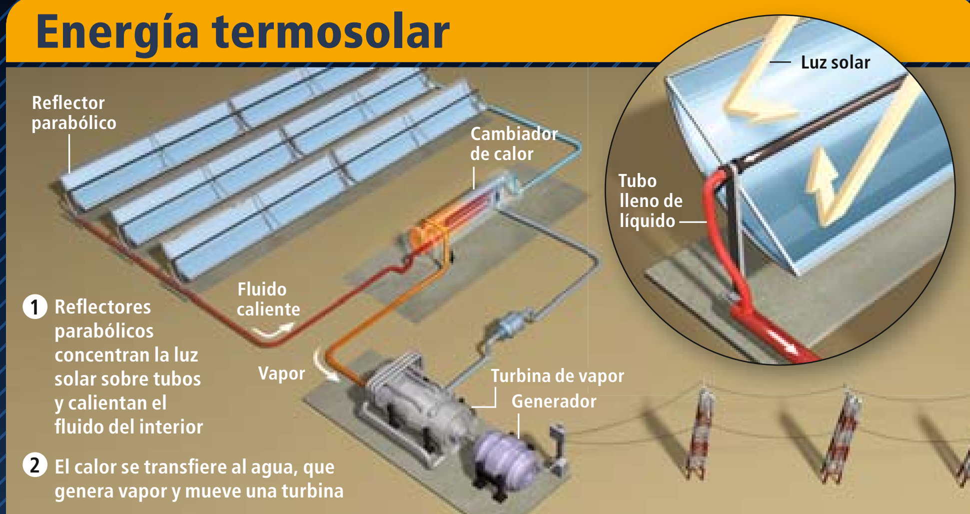
Se expone en las páginas siguientes una panorámica de los elementos de un sistema energético que contase con una gran participación de energías renovables, así como las diversas formas en que éstas podrían acoplarse entre sí.

JUSTIN SULLIVAN *Getty Images* (*coche eléctrico*); LESTER LEFKOWITZ (*paneles solares*); SCOTT OLSON *Getty Images* (*letrero etanol*); ARCTIC-IMAGES/CORBIS (*planta geotérmica*); GEORGE FREY *Getty Images* (*turbina eólica*)

Generación de energía eléctrica

Ninguna de las técnicas es la panacea,

Energía termosolar

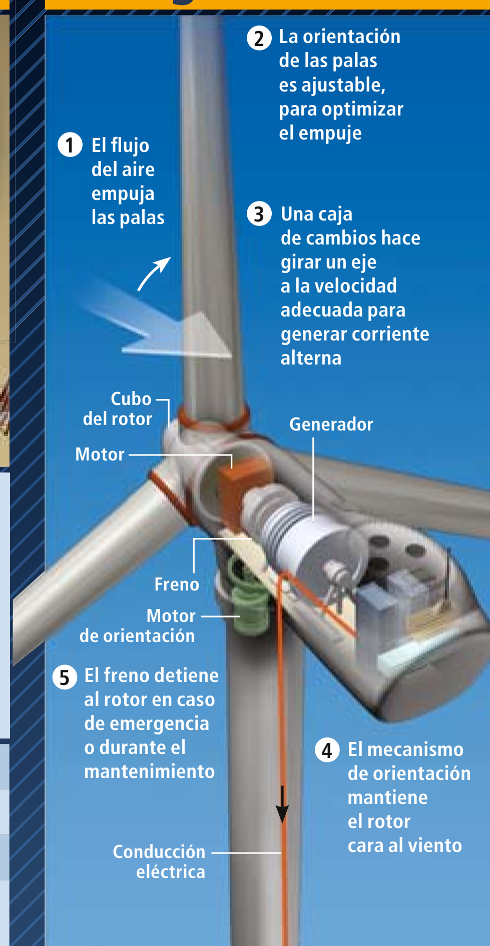


En una planta termosolar, un espejo parabólico va siguiendo al Sol durante el día; enfoca la luz sobre un tubo negro y calienta un fluido oleoso o acuoso. El tubo serpea kilómetros hasta un cambiador de calor, donde se genera vapor para mover una turbina. Al sistema se le adjunta una central térmica de gas natural, que produzca el vapor durante períodos de nubosidad o después de la puesta de sol. En modelos futuros el fluido de trabajo podría ser sodio fundido; ello permitiría alcanzar temperaturas más elevadas sin tener que manejar altas presiones.

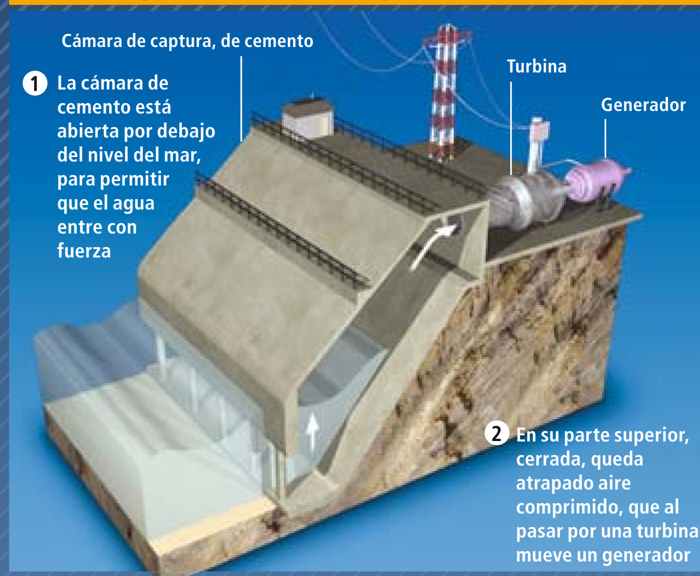
Una variante corresponde a la "torre de energía", que guarda semejanza con un depósito de agua. Está llena de sodio fundido y calentada por una serie de espejos, distantes hasta un kilómetro. Para almacenar esta energía, el sodio se conectaría a un tanque aislado térmicamente, con capacidad para operar las veinticuatro horas del día o, al menos, para dar servicio hasta bien entradas las horas de máxima demanda.

ESTADO ACTUAL	Sistemas parabólicos: en explotación comercial; las torres de energía, en fase experimental
PRECIO	Entre 0,16 y 0,23 euros/kWh (reflectores parabólicos)
A FAVOR	Quizá sea, de entre todas las renovables, la más indicada para el almacenamiento
EN CONTRA	Requiere terrenos llanos; los recursos óptimos pueden distar mucho de las conducciones existentes; perturba ambientes desérticos impolutos; puede exigir agua de refrigeración, difícil de hallar en los desiertos, las regiones de mayor insolación

Energía eólica



Energía del oleaje



La producción hidroeléctrica no puede aumentar más, habida cuenta de los problemas ambientales de los embalses. Pero, según el Departamento de Energía, la costa noroccidental del Pacífico podría producir de 40 a 70 kilowatt por metro. La explotación de la energía del mar va muy por detrás de la eólica, la solar y la geotérmica. Los inventores llevan dos siglos solicitando patentes para la energía de olas y mareas.

Una posible técnica consiste en una columna, de acero o de cemento, abierta por debajo del nivel del mar y cerrada por arriba. Cada cresta y cada seno de las olas comprime o expande el aire encerrado en lo alto, que mueve una turbina. En Escocia, Wavegen, una compañía en la que participa Siemens, puso hace poco en explotación un generador de 100 kilowatt basado en este sistema. En otros diseños se extrae energía de las subidas y bajadas de un flotador.

ESTADO ACTUAL	En fase experimental; aún no está a punto para la explotación comercial
PRECIO	Resulta prematuro estimarlo
A FAVOR	Las líneas de transporte suelen ser cortas
EN CONTRA	La construcción de estructuras duraderas en zonas de fuerte oleaje resulta onerosa

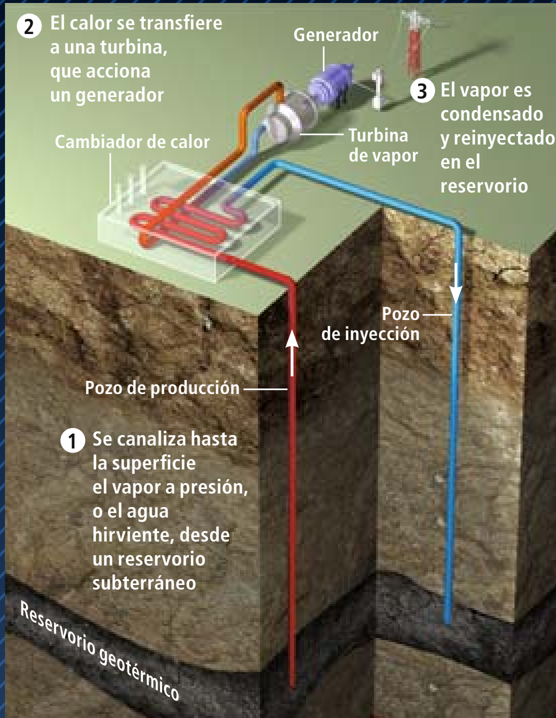
pero en combinación pueden crear un sistema sólido de suministro energético.

La energía eólica es la más prometedora, la más avanzada y, tal vez, la más problemática de las renovables. Sólo en 2007, se instalaron en EE.UU. más de 5000 megawatt nuevos, un incremento del 46 por ciento sobre la base preexistente. Pero la aportación en kWh fue mucho menor, porque, incluso en buenos emplazamientos, el viento proporciona sólo alrededor del 28 por ciento de la energía eléctrica que se podría producir en régimen óptimo durante las 24 horas del día. Peor todavía, el viento es más regular por la noche, cuando escasea la demanda.

Se están recortando costes por medios técnicos, en parte, con aerogeneradores de mayor tamaño. Los más modernos llegan a producir 6 Mw, suficiente para varios centros comerciales. En tales máquinas, cada pala mide unos 65 metros, la envergadura de un Boeing 747, aproximadamente. Los nuevos modelos, sumamente eficientes, capturan alrededor de la mitad de la energía del aire que pasa por ellos.

ESTADO ACTUAL	Comercial, en rápido desarrollo
PRECIO	Entre 0,48 y 0,67 euros/kWh (el transporte puede elevar estos valores)
A FAVOR	Ofrece máximas posibilidades de producción energética; no necesita agua de refrigeración
EN CONTRA	Correlación deficiente entre producción y demanda; afeamiento del paisaje y molestias por el ruido de los generadores y de las torres de transporte; riesgos para aves y murciélagos; posibles interferencias con los radares de vigilancia aérea; los mejores emplazamientos no se encuentran próximos a los centros de población

Energía geotérmica

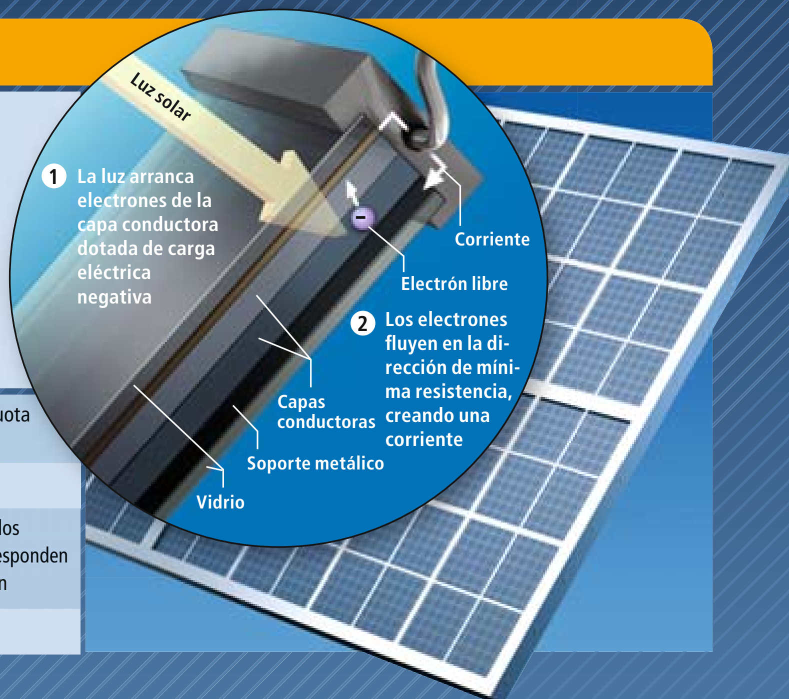


A diferencia de las energías eólica o solar, la geotérmica está disponible bajo demanda. "El calor del interior de la Tierra está siempre ahí; se puede confiar en él", afirma Steven Chu, director del Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley. Las centrales geotérmicas operan, de ordinario, las 24 horas del día. No todas las localidades disponen de rocas calientes. Hawai genera por esa vía la cuarta parte de su energía eléctrica; California, un 6 por ciento. Las instalaciones geotérmicas existentes se valen de agua caliente que asciende por sí sola hasta la superficie. Los defensores de esta energía afirman que EE.UU. cuenta con grandes áreas de "roca seca caliente" que exigiría meramente la inyección de agua a través de un pozo profundo. En casi todos los sistemas se utiliza un intercambiador de calor para poner en ebullición agua limpia, generar vapor y mover una turbina.

ESTADO ACTUAL	Explotación comercial, pero escasa
PRECIO	0,49-0,67 euros/kWh
A FAVOR	El suministro es lo bastante fiable para servir de base
EN CONTRA	El vapor procedente del subsuelo suele arrastrar componentes nocivos, que pudren los intercambiadores de calor y que, liberados, contaminan el aire. Su ubicación es capricho de la naturaleza y a menudo no resulta conveniente para las líneas de transporte existentes

Energía solar fotovoltaica

Los paneles fotovoltaicos constan de una estructura bilaminar, con dos estratos de materiales semiconductores, rico en electrones uno de ellos y, el otro, en "huecos". La absorción de luz solar provoca el salto de algunos electrones sobrantes de una capa a la otra, creando una corriente eléctrica. El efecto fotoeléctrico fue observado hace 169 años y todavía se trabaja para optimizarlo. Tuvo su primera aplicación en el programa espacial. Las células fotovoltaicas son ampliamente utilizadas para generar electricidad en puntos de difícil o costosa conexión a la red, pero el precio de la electricidad que producen no es competitivo con la de combustibles fósiles o de otras renovables. Los paneles pueden incorporarse en nuevas construcciones, sea en el tejado o en el revestimiento de la fachada; el coste sería, entonces, menor.



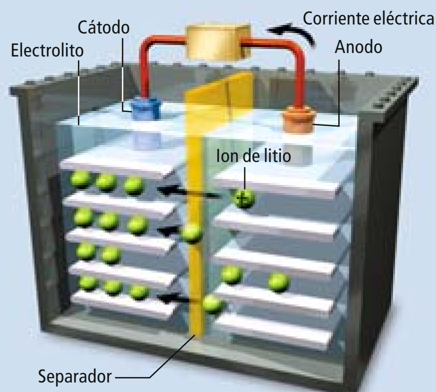
ESTADO ACTUAL	Uso comercial, pero resulta competitiva en la red sólo si se impone por cuota o se subvenciona.
PRECIO	Entre 0,38 y 0,56 euros/kWh
A FAVOR	Pueden instalarse en zonas eléctricamente congestionadas, con ahorro en los costes de generación y de nuevos tendidos; los picos de producción se corresponden bastante bien con los picos de demanda; no requieren agua de refrigeración
EN CONTRA	Pocos se lo pueden permitir; la producción es limitada

Almacenamiento y distribución

Las fuentes energéticas intermitentes, como la eólica y la solar, exigen sistemas de almacenamiento y distribución. Existen varias posibilidades.

Baterías para automoción

Los fabricantes de automóviles quieren una batería de ion litio que dure 15 años y soporte 5000 ciclos de carga, mucho más que las baterías empleadas en equipos de consumo. El objetivo es un coste de unos 250 euros por kWh almacenado utilizable, en una batería con una autonomía para unos 65 kilómetros, suponiendo que cada kWh permitiera unos 5 kilómetros. General Motors proyecta comercializar en 2010 un híbrido enchufable a la red; la versión de Ford tardará cinco años.

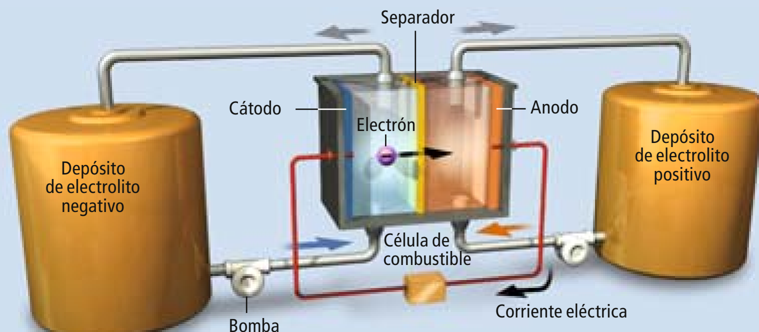


Células de combustible

La electricidad, cualquiera que sea su origen, solar, eólico, o térmico, se utiliza para descomponer por electrólisis las moléculas de agua, separando el oxígeno y el hidrógeno que las forman. Después, el hidrógeno se lleva a una célula de combustible para generar electricidad. Un inconveniente de las células de combustible es que requieren una inversión de miles de euros por kW de capacidad; asimismo, la eficiencia global del ciclo, desde el electrolizador hasta la célula de combustible, y de ésta a electricidad, es inferior al 50 por ciento (por cada dos kWh almacenados, ni siquiera se recupera uno).

Baterías amovibles

Una compañía de Vancouver, VRB, vende "baterías de flujo" provistas de depósitos que contienen centenares o miles de litros de electrolitos. Cuando se las hace operar en carga, el sistema absorbe energía; en descarga, la devuelven, en cantidades de megawatt-hora. El almacenamiento de un kWh cuesta entre 400 y 500 euros; el rendimiento global se encuentra entre el 65 y el 75 por ciento, lo que significa que la batería pierde entre un 25 y un 35 por ciento de la electricidad que se le suministra. El sistema elevaría el precio del kWh termosolar en un 50 por ciento o más.

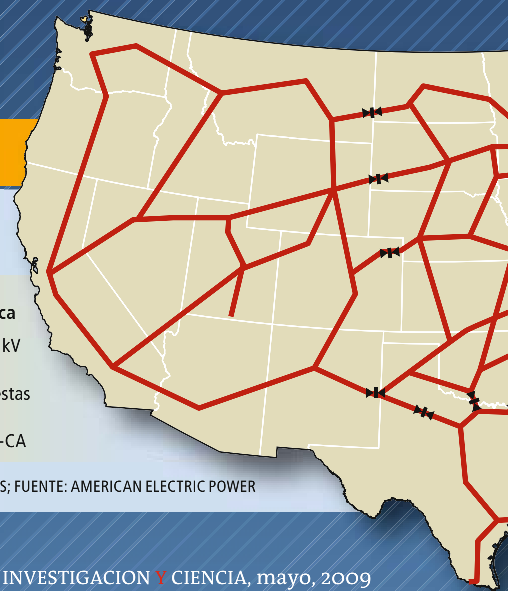


Aire comprimido

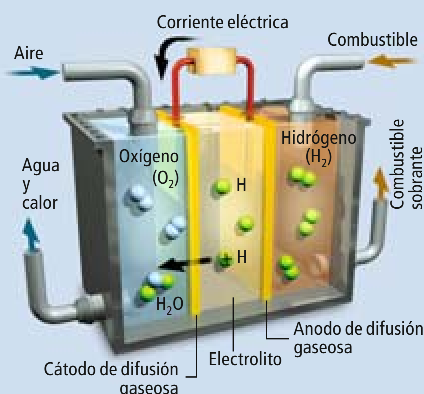
En 1991, Alabama Energy Cooperative puso en servicio un almacén de energía. Se guarda aire comprimido a una presión de unos 7 megapascal (unas 70 atmósferas) en un domo de sal subterráneo (previamente vaciado); se utilizan para el bombeo centrales de carbón, que a menudo se encuentran inactivas por la noche. Cuando se necesita aumentar la producción durante el día, se inyecta aire comprimido en una turbina de combustión alimentada por gas natural. De ordinario, la propia turbina se encarga de comprimir el aire que necesita; el generador más eficiente requiere unas 1500 kilocalorías (unos 1,75 kWh) para producir 1 kWh. Con aire previamente comprimido se reduce en un tercio el consumo de gas natural.

Transporte de electricidad

Las fuentes intermitentes resultan menos problemáticas si se conectan a una red de grandes dimensiones; una región con un centenar de instalaciones eólicas y solares dispersas contaría con cierto promedio de ingreso energético. Pero la red de transporte existente no tiene capacidad para transferir a enormes distancias energía "al por mayor". Según explicó el Departamento de Energía en 2008, una solución consistiría en la creación en la red de un nuevo "espinazo" de transporte a muy alta tensión, algo así como un sistema de grandes autovías interestatales. Comprendería unos 30.000 kilómetros de líneas de transporte, con torres de 40 metros, a un coste de unos 2 millones de euros por kilómetro. Para reducir las pérdidas, el voltaje se elevaría hasta 765 kV. No harían falta nuevas técnicas, pero el sistema exigiría dos elementos de los que EE.UU. carece por ahora: un compromiso nacional para unificar el sistema eléctrico a escala continental y una inversión de unos 50 millardos de euros.



MAPPING SPECIALISTS; FUENTE: AMERICAN ELECTRIC POWER



Almacenamiento en hielo

Ice Energy, de California, comercializa equipos que producen en los sótanos de los edificios durante la noche bloques de hielo de 2 metros cúbicos. La fabricación nocturna resulta menos costosa que la diurna, porque el aire, que refrigera el compresor, está más frío durante la noche. El hielo se utiliza para refrescar el edificio durante el día. Se trata de utilizar energía eléctrica producida durante la noche (como la eólica) para un trabajo que será necesario durante el día.

Combustibles para automoción

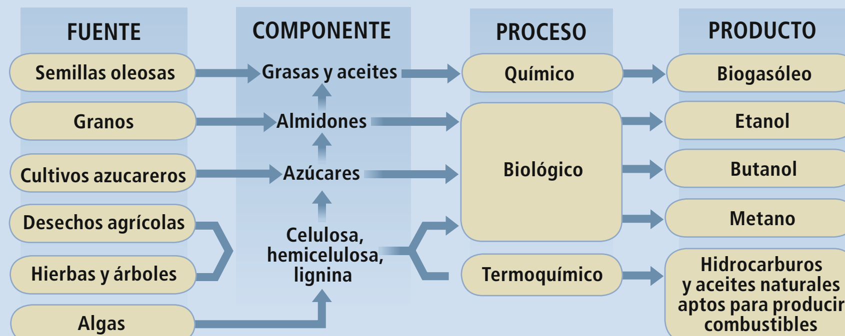
Existen tres grandes líneas en la producción de combustibles líquidos para automoción a partir de fuentes renovables. La primera consiste en emplear aceites vegetales, casi siempre de soja o de palma, en motores diésel. En EE.UU., para que su uso sea legal, es preciso convertir los aceites en ésteres. El proceso, sencillo, se realiza sólo a pequeña escala. La iniciativa está aprisionada en el debate de si estos aceites deben ser combustibles o alimentos.

Igualmente sencillo es dejar que las levaduras digieran azúcares y produzcan alcoholes. Pero también aquí se actúa a pequeña escala, lo que da pie a que la gasolinera de la esquina y el supermercado de enfrente se disputen la producción.

Por otra parte, ingentes cantidades de azúcares polimerizados se encuentran empaquetadas en las partes no comestibles de los cultivos para alimentación, como la paja del trigo o los tallos del maíz. Este material celulósico contiene azúcares hexacarbonados y pentacarbonados, que no son del agrado de las levaduras ordinarias.

Existen plantas piloto que utilizan vapor, ácidos, o una combinación de ambos, para liberar estos azúcares y procesarlos por una tercera vía. Otra opción consiste en recurrir a enzimas procedentes de hongos o bacterias modificados genéticamente. Para convertir los azúcares en combustibles líquidos hay quienes se sirven de procesos catalíticos; otros recurren a levaduras, a menudo, transgénicas. También es posible descomponer el material celulósico en gases combustibles, mezclas de monóxido de carbono e hidrógeno, y reconvertirlos luego en moléculas hidrocarbonadas como etanol, metanol u otros líquidos combustibles. Entre las posibles fuentes utilizables se contarían detritus forestales (astillas, cortezas y piñas de coníferas), residuos domésticos (papeles y plásticos) y residuos agrícolas.

Todos estos procedimientos han demostrado ser factibles en el laboratorio o en ensayos a pequeña escala, pero su viabilidad comercial sigue siendo problemática. No obstante, los incentivos y las reservas de cuota están acicateando un gran número de iniciativas.



FUENTE: "BIOFUELS FOR TRANSPORTATION", POR NAOMI PENA Y JOHN SHEEHAN EN *CDM INVESTMENT NEWSLETTER*, N.º 3, 2007

ESTADO ACTUAL	Tratan de abrirse paso hasta la producción comercial
PRECIO	Sin determinar. El precio de referencia es incierto, por la gran variabilidad de los precios de gasóleos y gasolinas
A FAVOR	Algunos biocombustibles contienen poco o ningún carbono; menor dependencia de importaciones de crudo
EN CONTRA	Ciertos combustibles presionan al alza los precios de los alimentos; la producción de biocombustibles a partir de grano exige gran consumo de combustibles fósiles, por lo que el saldo final en ahorro de energía y carbono es escaso; la mayoría de los biocombustibles tienen un poder energético menor que la gasolina y su consumo por kilómetro es mayor

El autor

Matthew L. Wald
es periodista del *New York Times*, donde viene cubriendo temas energéticos desde 1979. Ha escrito sobre refino de crudo, producción de electricidad, automoción eléctrica e híbrida, y contaminación atmosférica.

Bibliografía complementaria

Informe del Departamento de Energía de EE.UU. para atender en 2030 el 20 por ciento de las necesidades de electricidad con energía eólica: **www1.eere.energy.gov/windandhydro**

Central híbrida que se construirá en California, que producirá electricidad solar cuando sea posible y mediante gas natural cuando no lo sea: **www.inlandenergy.com**

Datos sobre el etanol celulósico facilitados por la Asociación estadounidense de Combustibles Renovables: **www.ethanolrfa.org/resource/cellulosic**

¿LLEGARA LEJOS EL ETANOL? Matthew L. Wald en *Investigación y Ciencia*, marzo 2007.



LA RAREZA DE LAS ESPECIES

Una especie es rara o común según su extensión geográfica, abundancia local, especificidad del hábitat y ocupación de éste. El estudio de la rareza nos informa sobre la biodiversidad y facilita la planificación de acciones conservacionistas

JOSE MARIA REY BENAYAS

Muy pocos son los conceptos que igualan al de diversidad en la generación de estudios ecológicos. Hewett C. Watson observaba ya en 1835 cierta correlación entre el número de especies de plantas que medraban en los condados ingleses y la superficie del territorio. De esa observación partiría, andando el tiempo, la relación entre especies y área, según la cual el número de especies de un área determinada aumenta con la superficie, aunque con una tasa de incremento progresivamente menor.

En 1878, Alfred R. Wallace describió la relación inversa entre latitud y riqueza de especies. Con otras palabras, el aumento del número de especies que contemplamos a medida que descendemos de latitudes polares a latitudes tropicales. A Charles Darwin debemos la tesis de la relación positiva entre riqueza de especies y productividad.

Todos los trabajos sobre la biodiversidad mencionados se referían al número de especies. Los ecólogos han mantenido en buena medida esa tendencia al estudio cuantitativo, centrándose en las regularidades de la diversidad y los mecanismos que las originan. Pero importa también conocer en qué medida las especies de una comunidad o territorio son comunes o raras.

La noción de "rareza" de las especies (otro componente de la diversidad) ha recibido menos atención en la investigación ecológica. Para comprobarlo, basta consultar el archivo *ISI Web of Knowledge*: de 2001 a 2008, esta base de datos arroja 95.547 referencias con la palabra "diversidad", 14.149 con "riqueza de especies" y 970 con "rareza de especies".

Formas de rareza y teorías

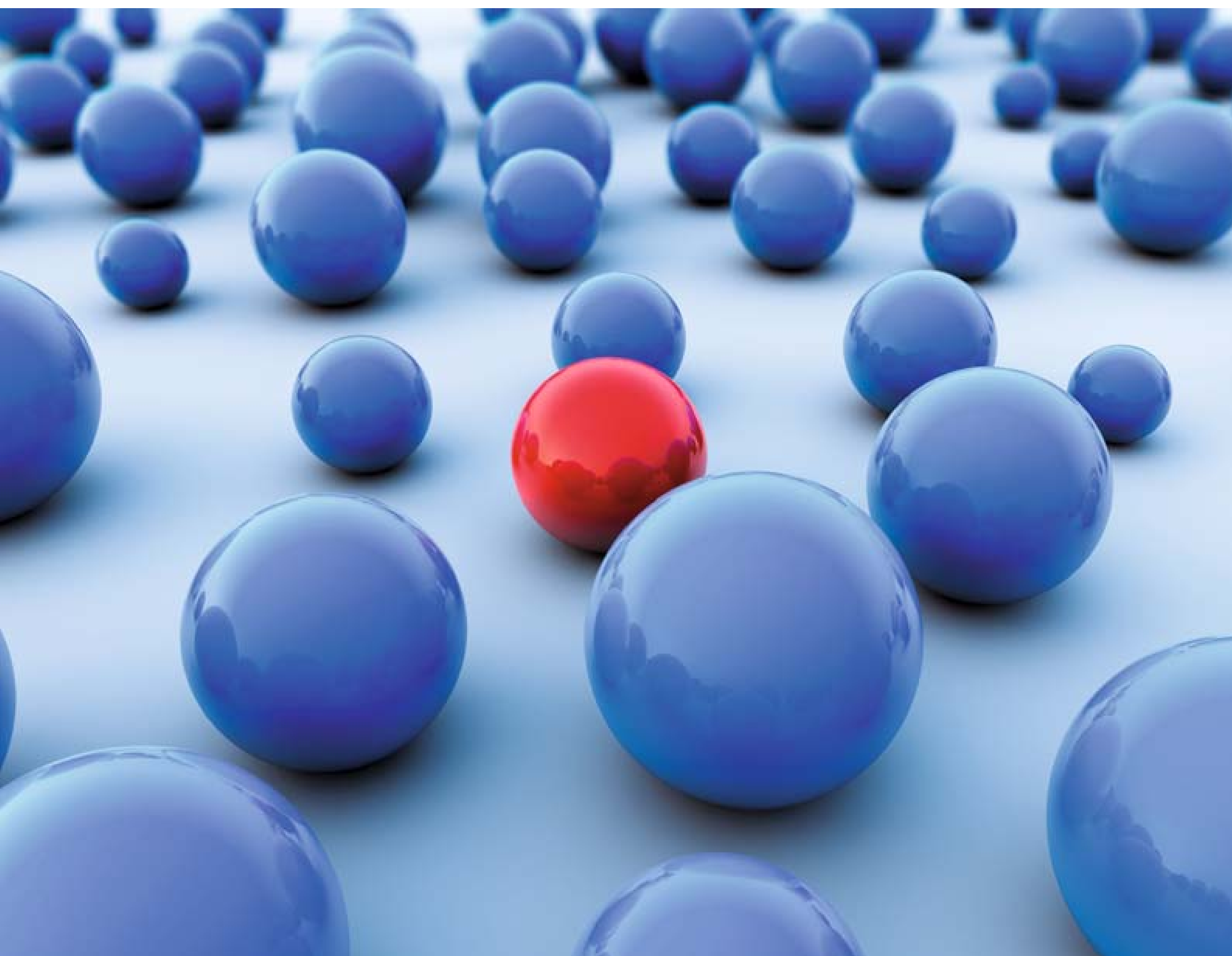
¿De qué depende que una especie sea más o menos rara? La cuestión se ha tornado central en el debate en torno al cambio global y la conservación de las especies. Cuatro factores principales determinan la rareza de una especie: la extensión geográfica que ocupa, su especificidad de hábitats o amplitud ecológica, la abundancia que alcanza en una determinada localidad y la ocupación del hábitat.

No abundan las hipótesis sobre la rareza de las especies. Algunas se basan en la investigación empírica; así, la hipótesis de la biogeografía insular declara que el número de especies en áreas insulares muestra una relación positiva con el tamaño de las islas y negativa con la distancia de éstas al continente o fuente de las especies. Contamos también con la regla de Rapoport, que afirma que la extensión geográfica de las especies aumenta con la latitud, aunque esta teoría ha generado controversia por la falta de solidez en su demostración.

A partir de la biología de los organismos, contamos con dos teorías que explican regularidades macroecológicas, es decir, la distribución, abundancia y diversidad en áreas geográficas extensas. Nos referimos a la teoría de Brown y a la noción del compromiso entre las especies generalistas y las especialistas. La

CONCEPTOS BASICOS

- Las especies vienen considerándose raras o comunes atendiendo a tres factores: extensión geográfica, especificidad de hábitat y abundancia local.
- Se propone un cuarto criterio, la ocupación del hábitat, que mide la capacidad de una especie para ocupar una fracción mayor o menor de sus hábitats potencialmente favorables.
- En un mundo cuya biodiversidad está amenazada por el cambio global, la investigación sobre la rareza de las especies resulta crítica para proponer medidas eficaces de conservación y restauración de ecosistemas.



1. **AMEN DE LA ABUNDANCIA local, otros factores determinan la rareza de las especies.**

de Brown se conoce también por teoría del organismo superior. Parte de la premisa de que las especies varían en su capacidad para explotar los recursos que necesitan: unas especies disponen de un nicho ecológico extenso, explotan una amplia gama de recursos y toleran intervalos muy amplios de condiciones ambientales; otras especies cuentan con un nicho restringido. El centro de la extensión geográfica donde se halla presente una especie corresponde a la región en donde ésta puede explotar una mayor combinación de recursos y, por tanto, de hábitats; la especie presentará aquí su mayor abundancia local. Conforme nos alejamos de ese centro, los recursos y condiciones que favorecen a la especie escasean cada vez más. Se estrecha la especificidad de su hábitat y disminuye su abundancia local. A las especies con un nicho ecológico amplio les corresponde, pues, una extensión geográfica vasta; a las especies con un nicho ecológico limitado, una extensión geográfica reducida.

En el marco teórico de la vieja noción del compromiso entre las especies generalistas y las especialistas —un concepto darwinista—, distinguimos también entre nichos ecológicos extensos y reducidos. La especificidad del hábitat se mantiene a lo largo de la extensión geográfica de la especie, sin disminuir hacia el límite de dicha extensión. Por otro lado, la especificidad del hábitat se “equilibra” con la abundancia local, de suerte tal, que los especialistas presentan abundancias elevadas allí donde se encuentran, mientras que los generalistas evidencian una distribución más amplia aunque con abundancias locales reducidas.

Ambas teorías predicen varios grados de rareza. La teoría del organismo superior pro-

nostica, en su forma más extrema, la existencia de dos categorías: especies superiores con una extensión geográfica amplia, especificidad de hábitat elevada, abundancia local notable y ocupación del hábitat alta, y especies inferiores con la combinación opuesta de factores. A esas categorías las denominamos especies "comunes" y especies "amenazadas", respectivamente. Caben categorías intermedias.

La hipótesis del compromiso entre generalistas y especialistas predice también dos categorías opuestas: las especies "dispersas" e "indicadores endémicos". Las primeras son especies generalistas con una extensión geográfica amplia, especificidad del hábitat elevada, abundancia local reducida y ocupación del hábitat baja; los indicadores constituyen especies especialistas con la combinación de

¿RARA O COMUN?

EXTENSION, ESPECIFICIDAD Y ABUNDANCIA

Deborah Rabinowitz propuso en 1981 un esquema que resultaría básico para el estudio de la rareza. Clasificó las especies de acuerdo con tres criterios (*azul*): extensión geográfica, especificidad del hábitat y abundancia local. Cualquier especie puede dividirse en dos categorías atendiendo a cada uno de estos tres criterios: extensión geográfica amplia o estrecha, especificidad del hábitat elevada o restringida y abundancia local elevada o reducida. En opinión de Rabinowitz, sólo una de las ocho combinaciones posibles (extensión geográfica amplia, especificidad del hábitat elevada y abundancia local elevada) define una especie común (*verde*). Las otras siete combinaciones corresponden a distintas formas de rareza.

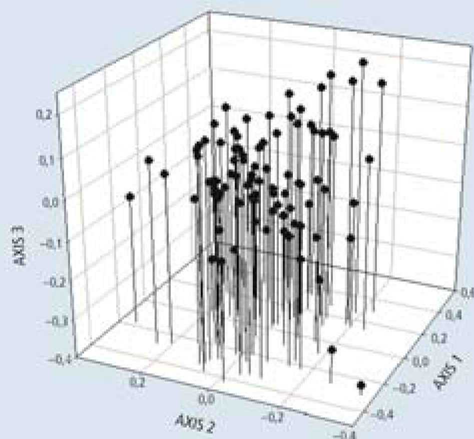
EXTENSION GEOGRAFICA		AMPLIA				PEQUEÑA			
ESPECIFICIDAD DEL HABITAT		ELEVADA		RESTRINGIDA		ELEVADA		RESTRINGIDA	
ABUNDANCIA LOCAL		ELEVADA	REDUCIDA	ELEVADA	REDUCIDA	ELEVADA	REDUCIDA	ELEVADA	REDUCIDA
OCUPACION DEL HABITAT	ALTA	COMUN	EXTENDIDA	INDICADOR		LOCALMENTE COMUN	INEXISTENTE	INDICADOR ENDEMICO	
	BAJA	MUY DISPERSA	DISPERSA	LOCALMENTE AMENAZADA		POTENCIALMENTE AMENAZADA		AMENAZADA	

UN CUARTO FACTOR: LA OCUPACION DEL HABITAT

Pero los tipos de rareza pueden ampliarse con un cuarto criterio, independiente de los tres anteriores: la ocupación del hábitat (*naranja*). Dentro de la especificidad del hábitat de una especie, puede considerarse la capacidad para ocupar una fracción mayor o menor de sus hábitats potencialmente favorables. Una de las dieciséis combinaciones posibles del esquema corresponde a una especie común: extensión geográfica amplia, especificidad del hábitat elevada, abundancia local elevada y ocupación del hábitat alta. Esta visión incluye un grupo de especies localmente comunes (*rojo*). También las especies de las categorías "extendida" y "muy dispersa" (*amarillo*) podrían considerarse comunes.

Volumen explotado

La ocupación del hábitat de una especie puede medirse mediante el modelo del volumen de recursos y condiciones ambientales que utiliza. Este volumen, abstracto, se corresponde con el nicho ecológico de George E. Hutchinson, es decir, el conjunto de factores que afectan al funcionamiento de los individuos de una especie.
En el caso de la figura, el volumen se obtiene mediante la representación de un conjunto de inventarios (*puntos negros*) que ocupa una especie en función de tres combinaciones de variables ambientales (clima, geomorfología, topografía, humedad, composición química del suelo, etcétera). Dado que no todos los inventarios analizados incluidos en dicho volumen contienen la especie en estudio, aparecen "huecos" en el volumen que, en teoría, puede explotar. La proporción del volumen ocupado constituye una medida de la ocupación del hábitat.



VOLUMEN EXPLOTADO por las especies de plantas en los prados húmedos de la sierra de Guadarrama.

JOSE MARIA REY BENAYAS



2. EN 66 PRADOS HUMEDOS DE LA SIERRA DE GUADARRAMA se muestrearon 220 especies de plantas vasculares perennes. La tabla enseña los porcentajes correspondientes a cada una de las 16 categorías de rareza. La distribución no es uniforme. Las categorías con una representación mayor registran una alta ocupación del hábitat. Las especies más frecuentes corresponden a las indicadoras endémicas con abundancia local reducida (*rojo*); les siguen las especies comunes (*amarillo*). Las categorías menos frecuentes son las cuatro con especificidad del hábitat elevada y abundancia local reducida (*verde*). Tal como predice el modelo, ninguna especie presentó las características de extensión geográfica pequeña, especificidad del hábitat elevada, abundancia local reducida y ocupación del hábitat alta.

JOSE MARIA REY BENAYAS

EXTENSION GEOGRAFICA		AMPLIA				PEQUEÑA			
ESPECIFICIDAD DEL HABITAT		ELEVADA		RESTRINGIDA		ELEVADA		RESTRINGIDA	
ABUNDANCIA		ELEVADA	REDUCIDA	ELEVADA	REDUCIDA	ELEVADA	REDUCIDA	ELEVADA	REDUCIDA
OCUPACION DEL HABITAT	ALTA	9,5	0,9	5,0	7,7	7,3	0,0	8,2	35,5
	BAJA	4,5	1,4	2,2	2,7	5,0	1,8	4,5	3,6

atributos inversa. Lo mismo que en el caso precedente, se dan categorías intermedias, si bien ni aquí ni antes resultan válidas todas las combinaciones posibles.

En cuanto a las relaciones entre las características de las especies, la teoría del organismo superior predice correlaciones positivas entre la amplitud geográfica, la especificidad de hábitat, la abundancia local y la ocupación del hábitat. La teoría del compromiso entre generalista y especialista predice correlaciones positivas entre la extensión geográfica y la especificidad de hábitat, y entre la abundancia local y la ocupación del hábitat, y correlaciones negativas entre estos dos grupos de criterios.

Rareza en la sierra de Guadarrama

A partir de esas categorías, el autor y sus colaboradores Manuel García, del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), y Catherine Levassor, de la Universidad Autónoma de Madrid, estudiaron la rareza de las plantas muestreadas en 92 inventarios de prados húmedos de la sierra de Guadarrama. Los resultados reflejan la presencia de especies superiores y especialistas. Constituyen buenos ejemplos de especialistas la menta (*Mentha cervina*) y la juncea (*Scirpus lacustris)*. Ambas se identificaron en uno o dos inventarios, donde eran con diferencia las de mayor abundancia; medran en cubetas de agua con inundación muy fluctuante. Existen también plantas generalistas, como el trébol de los prados (*Trifolium pratense)*, presente en un número elevado de inventarios, aunque con una baja abundancia local. Dos ejemplos de organismos superiores son el cervuno (*Nardus stricta*) y el junco (*Juncus acutiflorus*), que aparecen en numerosos inventarios y con una abundancia local elevada.

Apenas se hallaron pruebas de especies con una especificidad del hábitat elevada y abundancias locales reducidas. Las categorías con menor número de especies ofrecían una abundancia local entre media y baja o una ocupación del hábitat baja. Esas especies serían las más expuestas a la extinción en una dinámica demográfica estocástica. Podrían ser infrecuentes porque tienden a extinguirse antes, no porque no puedan evolucionar.



Ninguna de las especies muestreadas en esos prados húmedos aparece en las listas oficiales de especies amenazadas en la península Ibérica. Sin embargo, *Eleocharis quinqueflora*, *Ilex aquifolium* y *Juncus bulbosus* se incluyen en el catálogo oficial de especies amenazadas de la Comunidad de Madrid. Las dos primeras corresponden a indicadores endémicos. De las 28 especies que pertenecen a la categoría "amenazadas", *Cardamine pratensis*, *Carex panicea* y *Juncus bulbosus* son raras y podrían considerarse amenazadas en la región estudiada. Sólo *Juncus bulbosus* entra en la categoría "vulnerable" del catálogo mencionado. Otras especies son raras en los humedales, debido a su naturaleza leñosa o adaptación característica a otros hábitats (xerófitas y mesófitas).

Ocupación de sitios y modelos

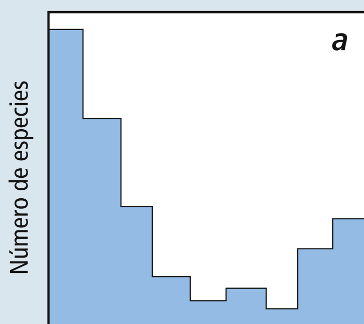
La ocupación del hábitat constituye, pues, uno de los factores principales que determinan la rareza de las especies. En un conjunto de comunidades de cualquier tipo de organismo, las especies pueden estar presentes o ausentes en una fracción mayor o menor del conjunto. Los modelos que explican la frecuencia de ocupación son de dos tipos: los dinámicos, basados en la teoría insular, o modelos de metapoblaciones, y los estáticos, basados en la especialización ecológica, o modelos del nicho.

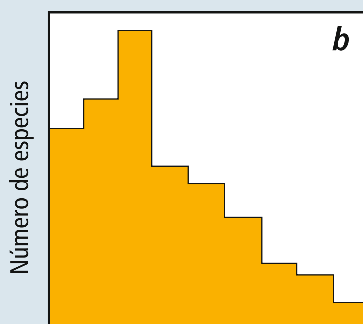
El concepto de metapoblación fue propuesto por Richard Levins. Se refiere a un conjunto de poblaciones de la misma especie, cada una de ellas aislada del resto. Existe impedimento para el flujo genético entre los individuos que pertenecen a las distintas poblaciones del grupo. Podemos establecer una analogía entre las metapoblaciones y un archipiélago: las islas vendrían a ser las poblaciones de la metapoblación.

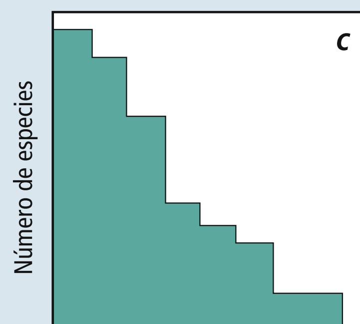
Los modelos de la frecuencia de ocupación (dinámicos y estáticos) permiten predecir la relación entre la frecuencia de ocupación, la abundancia local y el patrón de distribución. El autor, junto con Samuel M. Scheiner, de la Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU., analizó la distribución de plantas en varios tipos de ecosistemas extensos y representativos del globo. Los resultados mostraron mayor ajuste con los modelos del nicho

PATRONES DE DISTRIBUCION

Existen varios modelos de la frecuencia de ocupación, que se cobijan en dos grupos: los dinámicos, basados en la teoría insular, o modelos de metapoblaciones, y los estáticos, basados en la especialización ecológica, o modelos del nicho. Cada uno predice una distribución de la ocupación distinta, de acuerdo con las relaciones que se establecen entre la ocupación y las tasas de extinción e inmigración.







MODELOS DE METAPOBLACIONES I

- Tasas de extinción e inmigración dependientes de la ocupación.
- Predice una distribución bimodal: las especies tenderán a ser comunes o raras; pueden cambiar en el tiempo, al no ser la rareza una propiedad permanente.
- Relación positiva entre el número de sitios ocupados y la abundancia local de las especies.

MODELOS DE METAPOBLACIONES II

- Tasas de extinción e inmigración independientes de la ocupación.
- Predice una distribución unimodal. Las especies tenderán a ser comunes.
- Nula correlación entre el número de sitios ocupados y la abundancia local de las especies.

MODELOS DEL NICHO

- Predice una distribución unimodal. La moda se sitúa en 1 o cerca de 1. La mayoría de las especies se hallan en uno o pocos sitios (raras, subordinadas y especialistas); sólo algunas gozan de amplia distribución, facilitada por su capacidad de explotar los recursos (especies comunes, dominantes y generalistas).
- Relación positiva entre el número de sitios ocupados y la abundancia local de las especies.

JOSE MARIA REY BENAYAS



3. LA URRACA (*Pica pica*) constituye un ejemplo paradigmático de especie común. Su extensión geográfica es muy amplia: se encuentra en todo el Holártico (Norteamérica y Eurasia). Se trata de una especie generalista. Explota una amplia gama de recursos tróficos: carroña, frutos y semillas, invertebrados y pequeños vertebrados. Aparece en bosques y espacios abiertos, así como en ambientes humanizados. Tolera climas severos; se observa, además, en zonas secas o con inviernos fríos. Presenta abundancias locales elevadas.

que con los modelos de metapoblaciones: las especies con capacidad para explotar una gama amplia de recursos eran también localmente abundantes; asimismo, la mayoría de las especies se hallaban confinadas en uno o pocos sitios.

La mayor concordancia de los resultados con los modelos del nicho se debe al efecto de la heterogeneidad ambiental. Los modelos de metapoblaciones asumen un ambiente homogéneo (se les acusa de sobresimplificados). La heterogeneidad del ambiente, o mejor dicho, la percepción de dicha heterogeneidad, resulta clave para explicar la distribución y la abundancia de los organismos; sobre todo, los sésiles (plantas).

Diversidad mosaico

Los ecólogos miden la diversidad interna y la diversidad diferencial. La diversidad interna corresponde a la variedad de especies de una unidad ecológica; un cuadrado de muestreo que representa una comunidad o una región amplia, por ejemplo. La diversidad diferencial



4. EL GERANIO DEL PAULAR (*Erodium paularense*) constituye un endemismo del Sistema Central. De área geográfica extraordinariamente limitada, aparece confinado en unas pocas localidades sobre afloramientos rocosos. Las tres poblaciones reducidas que existen en la localidad del Valle del Lozoya se extienden sobre una superficie inferior a 5 kilómetros cuadrados; reúnen unos 15.000 individuos. Se ha descubierto la presencia de esta planta en otro punto, a unos 200 kilómetros hacia el este en las inmediaciones de Atienza (Guadalajara). Pero desconocemos la relación entre las plantas de ambas localidades; ciertas diferencias morfológicas y una acusada divergencia genética dificultan su clasificación taxonómica.

SKARABEUSZ (*urraca*); EDUARDO BARAHONA (*geranio del paular*)



JOSE MARIA REY BENAYAS

5. JARDINES de Disneyland, California. Cada uno de estos parterres, separados por bordillos blancos, contiene una variedad de flor ornamental. Los parterres reúnen numerosas variedades, lo que explica la riqueza total de flores. Lo mismo ocurre en la naturaleza. La diversidad total es elevada cuando las comunidades individuales albergan un gran número de especies (diversidad interna) o cuando las comunidades incluyen especies que difieren entre sí (diversidad diferencial).

informa de la distribución de las especies de una unidad ecológica en las subunidades que la constituyen; expresa, por ejemplo, el grado de semejanza de las especies existentes en un conjunto de comunidades.

Otro de los componentes esenciales de la diversidad es la complejidad de las comunidades, que puede evaluarse mediante la diversidad mosaico, una medida que incorpora la ocupación de sitios. Un valor elevado de diversidad mosaico indica que las comunidades presentan una estructura compleja, con gradientes ambientales numerosos y moderados. Cuando tal ocurre, parte de las comunidades incluyen sobre todo especies comunes, mientras que otras son ricas en especies raras (presentes en pocas comunidades). Un valor reducido de diversidad mosaico indica que las comunidades están afectadas por gradientes ambientales bruscos y comparten las mismas especies. Las especies tienden a ser, pues, ubicuistas. De hecho, existe una correlación elevada entre la variación de la frecuencia de ocupación de sitios y la diversidad mosaico.

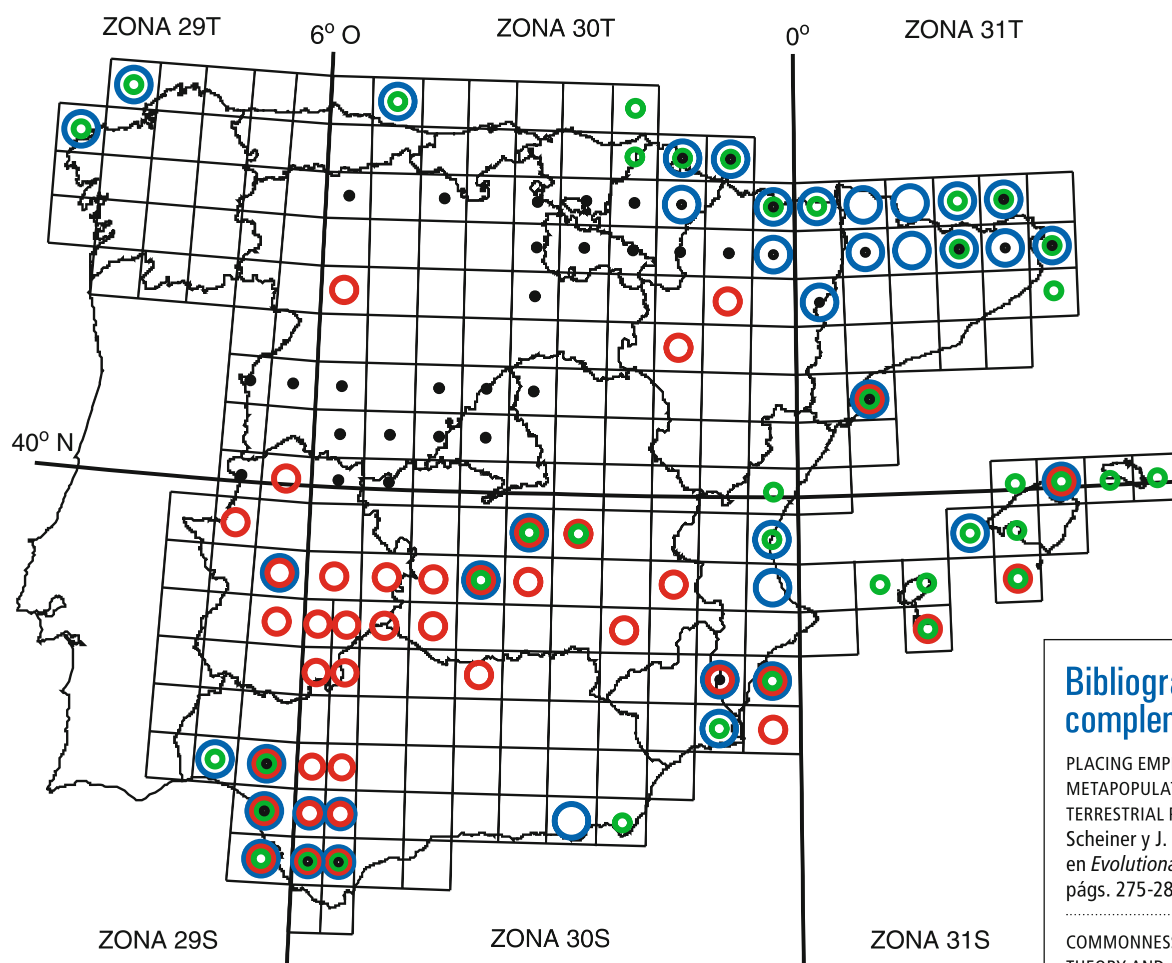
Dos estudios han explorado los factores que determinan la diversidad mosaico de las comunidades de plantas. Uno de ellos se realizó a escala global; el otro en la península Ibérica e islas Baleares. El primero llegó a la conclusión de que los valores elevados de diversidad mosaico correspondían a comunidades en regiones extensas, con inviernos suaves y alta productividad. El continente australiano, aislado desde tiempos remotos, es el que presentó comunidades de mayor complejidad. En los bosques tropicales se detectó el mayor valor de diversidad mosaico (un promedio de 5,33); en las tundras, los más bajos (un promedio de 3,22).

En la península Ibérica e islas Baleares, los paisajes con elevada evapotranspiración real (o efectiva) y situados en zonas de transición biogeográfica presentaban unos valores de diversidad mosaico muy altos. La evapotranspiración real corresponde, lo mismo que la productividad, a una medida de la energía biológicamente disponible. En la península Ibérica se distinguieron dos zonas de transición biogeográfica: una en el sudeste, entre las floras mediterráneas ibérica y norteafricana, y otra en el norte, entre la región mediterránea y la región eurosiberiana de clima atlántico. En esas transiciones biogeográficas, las comunidades comparten especies características de ambos lados de la frontera; muchas de esas especies tienden a hallarse en pocos sitios.

Existe, pues, un conjunto de procesos evolutivos y ecológicos que favorecen la aparición de especies raras. Entre los primeros podemos

El autor

José M. Rey Benayas obtuvo el doctorado en biología por la Universidad Autónoma de Madrid. Es catedrático del departamento de ecología de la Universidad de Alcalá. Centra su investigación en la ecología de especies leñosas, comunidades y paisaje, así como en la diversidad y la restauración de ecosistemas.



6. MAPA DE PUNTOS CALIENTES de diversidad de aves en la España peninsular y las Islas Baleares. Cada cuadrícula equivale a 50 kilómetros cuadrados (259 cuadrículas en total). Corresponden a las coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator). Se cartografían tres medidas de la biodiversidad: riqueza de especies, un índice de rareza basado en la distribución geográfica y un índice de vulnerabilidad basado en las categorías del Libro Rojo de los Vertebrados en España. Se incluye además un índice combinado de las tres medidas anteriores. La riqueza y la rareza de especies se extrajeron a partir de mapas de distribución de las especies. Las medidas de diversidad se ordenaron de mayor a menor; se consideraron puntos calientes las cuadrículas cuyos valores de diversidad pertenecían al 15 por ciento superior de las listas anteriores. Los colores simbolizan medidas de diversidad: riqueza de especies (*negro*), rareza (*verde*), vulnerabilidad (*rojo*) e índice combinado de las tres medidas anteriores (*azul*). Las 39 cuadrículas con el mayor índice combinado (*azul*) comprenden todas las especies de aves nidificantes excepto la graja (*Corvus frugilegus*), especie rara que medra en algunas choperas de la provincia de León.

MAPA ELABORADO POR EL AUTOR Y ENRIQUE DE LA MONTAÑA, DE LA UNIVERSIDAD DE ALCALA

señalar la especiación en sistemas aislados y la especialización en la explotación de determinados nichos. Entre los segundos cabe destacar la competencia entre especies, que puede traducirse localmente en la existencia de especies dominantes y especies subordinadas.

Puntos calientes de diversidad

La conservación de la biodiversidad *in situ* y la restauración de los ecosistemas no suele ser una tarea fácil. De ahí el interés de disponer de criterios que faciliten la detección de lugares en donde la ejecución de acciones conservacionistas resulta prioritaria.

Una de las tareas útiles para los proyectos de conservación es el descubrimiento de los puntos calientes de diversidad, es decir, las zonas con características relevantes de diversidad en un país o región. Los puntos identificados deben considerar no sólo la riqueza de especies, sino también la rareza y el grado de amenaza de las mismas. Una vez conocida la distribución de los puntos calientes de diversidad, podremos determinar si existen "huecos" por cubrir en una red de espacios naturales protegidos o si conviene ejecutar acciones de mitigación de impacto ambiental y restauración de ecosistemas.

Bibliografía complementaria

PLACING EMPIRICAL LIMITS ON METAPOPULATION MODELS FOR TERRESTRIAL PLANTS. S. M. Scheiner y J. M. Rey Benayas en *Evolutionary Ecology*, n.º 11, págs. 275-288; 1997.

COMMONNESS AND RARITY: THEORY AND APPLICATION OF A NEW MODEL TO MEDITERRANEAN MONTANE WETLANDS. J. M. Rey Benayas, S. M. Scheiner, M. G. S. Colomer y C. Levassor en *Conservation Ecology*, n.º 3, artículo 5; 1999.

FEMALE REPRODUCTIVE SUCCESS OF NARROW ENDEMIC *ERODIUM PAULARENSE* IN CONTRASTING MICROHABITATS. M. J. Albert, A. Escudero y J. M. Iriondo en *Ecology*, n.º 82, págs. 1734-1747; 2001.

DIVERSIDAD DE PLANTAS EN AMBIENTES MEDITERRANEOS. REGULARIDADES Y PROCESOS. J. M. Rey Benayas en *Ecosistemas mediterráneos. Análisis funcional*. Dirigido por R. Pugnaire y R. Zamora. AEET/CSIC; Madrid, 2001.

IDENTIFYING AREAS OF HIGH HERPETOFAUNA DIVERSITY THAT ARE THREATENED BY PLANNED INFRASTRUCTURE PROJECTS IN SPAIN. J. M. Rey Benayas, E. de la Montaña, J. Belliure y X. R. Eekhout, en *Journal of Environmental Management* n.º 79, págs. 279-289; 2006.

VIGILANCIA DE ENSAYOS NUCLEARES

La detección de eventuales ensayos de armas nucleares es ya tan efectiva y fiable que ningún país podría hacer uno en secreto, al menos no el de una bomba con alguna utilidad militar

Paul G. Richards y Won-Young Kim

CONCEPTOS BASICOS

- El monitorizado sísmico permite detectar una explosión nuclear de un rendimiento de un kilotón o más que se produzca en cualquier lugar del planeta. En muchos lugares, la detección es aún más sensible.
- Es probable que el presidente Barack Obama solicite al Senado de EE.UU. que reconsidere su voto de 1999 contrario al Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares (TPCE).
- Quienes se oponen al tratado aducen que algunos signatarios podrían hacer trampas y probar en secreto armas nucleares explosivas.
- La objeción de unos ensayos secretos que escapasen a toda detección, carece de base.

En calidad de presidente, me dirigiré al Senado para conseguir la ratificación del Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares tan pronto como me sea posible, y seguidamente emprenderé los esfuerzos diplomáticos necesarios para que hagan lo mismo otros estados cuyas ratificaciones son necesarias para que el tratado entre en vigor.

—*Barack Obama,*
10 de septiembre de 2008

Mientras se cerraba este artículo, el programa nuclear de Irán seguía ampliando su capacidad de enriquecer uranio. Los ataques terroristas de noviembre pasado en Mumbai (antes Bombay) de nuevo hicieron temer el intercambio de fuego nuclear entre India y Pakistán, una "guerra regional" que podría matar a decenas de millones de personas y causar graves cambios en el clima a escala planetaria. Y según se informa, Corea del Norte, que ingresó en el club nuclear el 9 de octubre de 2006 con su primera prueba con éxito de una bomba de fisión, ha separado uranio apto para armas en cantidad suficiente para construir al menos media docena de bombas atómicas. Ocho países han ensayado abiertamente armas nucleares. Se supone que Israel también las tiene. La posibilidad de que los terroristas pudieran poner sus manos en esas armas es la peor pesadilla del Departamento de Seguridad Interior de EE.UU. y de sus homólogos de todo el mundo.

Pero también hay señales esperanzadoras. A finales de 2008, 180 países habían firmado el Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares (TPCE), que prohíbe todas las explosiones nucleares, incluidas las de prueba de armas nucleares. Ese tratado, adoptado por la Asamblea General de Naciones Unidas en septiembre de 1996 y firmado de inmediato por el presidente Bill Clinton y otros dirigentes mundiales, pretende limitar ulteriores desarrollos de las armas nucleares por parte de los países que ya las poseen e impedir que los que aún carecen de ellas puedan tener alguna fe en que funcionarían en caso de que las fabricasen.

Aunque el TPCE no haya entrado en vigor aún, los países firmantes —incluidos EE.UU. y Rusia— han mantenido una moratoria sobre las pruebas de armas nucleares al menos desde que fue votado en la ONU. (Los tres países que han probado armas nucleares desde 1996 —India, Corea del Norte y Pakistán— no han firmado el tratado. En el recuadro "Cincuenta años de pruebas y controles nucleares" se re-

FRANCIA HIZO ESTALLAR esta arma nuclear en el Atolón de Mururoa, de la Polinesia Francesa, el 3 de julio de 1970. Actualmente las explosiones atmosféricas están prohibidas por tratado y no resulta demasiado difícil descubrirlas. Hoy la mayoría de los trabajos de monitorizado se centran en la detección de las explosiones subterráneas.

sumen los antecedentes históricos y políticos del TPCE.)

En EE.UU. continúa la moratoria, pese a una oposición enconada al tratado en sí. En 1999, el Senado rehusó conceder su constitucional "consejo y consentimiento" a la ratificación del acuerdo. Poco después de las elecciones de 2000, el presidente George W. Bush declaraba que el TPCE no contaba entre los intereses de la seguridad nacional.

Algunos senadores adujeron, para votar en contra del tratado, dudas acerca de la existencia de instrumentos que pudieran detectar las pruebas nucleares clandestinas y, por tanto, las violaciones del acuerdo. ¿Por qué renunciar a los ensayos, prosigue la argumentación, si EE.UU. no puede saber si otros países hacen trampas? Mientras dormimos, otros países podrían llevar a cabo en secreto unas pruebas que aumentarían su capacidad de dañar los intereses de EE.UU. y sus aliados.

En nuestra opinión, esas inquietudes carecen de base, desde hace años. Ha mejorado notablemente la capacidad de descubrir eventuales ensayos nucleares de interés militar relevantes en cualquier punto del mundo, en superficie o subterráneos, y distinguirlos de los hundimientos de minas, los terremotos y otros fenómenos que no son nucleares. Por ejemplo, el rendimiento del ensayo subterráneo de Corea del Norte efectuado en 2006 fue inferior a un kilotón (equivalente a 1000 toneladas de TNT). Pero se le detectó e identificó de inmediato. Comprobado que se dispone de esta capacidad de inspección, con mejoras continuas en los medios de control, la preocupación por que pueda haber pruebas nucleares clandestinas ya no brinda un fundamento sólido para oponerse al TPCE.

¿En busca de qué?

El arte de monitorizar explosiones nucleares es tan viejo como las mismas pruebas nucleares. Desde el principio, EE.UU. ha justificado esa vigilancia principalmente por la necesidad de recoger información acerca de la capacidad de adversarios potenciales. Una segunda razón importante ha sido el respaldo a los tratados internacionales sobre control de armas nucleares. Si un país que haya firmado un tratado de prohibición completa tiene razones para creer que muy posiblemente fracasará cualquier intento de ocultar un ensayo nuclear, el temor a las sanciones internacionales podría disuadirlo de acometerlo. Desde el final de la II Guerra Mundial se han realizado más de 2000 pruebas nucleares, en la atmósfera, bajo el agua y subterráneas. Gracias a este

NO HAY LUGAR OCULTO

La vigilancia se propone garantizar que todo intento de ocultación de una explosión nuclear carezca de sentido. Entre las muchas maneras en que las explosiones delatan su existencia se cuentan:


Las ondas sísmicas que atraviesan la roca maciza


Las ondas hidroacústicas, ondas sónicas que se propagan a grandes distancias por los mares


Los infrasonidos, sonido de baja frecuencia que se propaga centenares de kilómetros por el aire


Partículas y gases radiactivos transportados por el aire


Los cambios en la superficie del terreno, sobre todo los generados por una explosión subterránea, que se perciben desde el espacio


Los destellos luminosos: intensos y visibles desde el espacio



Rayos X visibles desde el espacio

SYGMA/CORBIS (*explosión nuclear*); LUCY READING-IKKANDA (*iconos*)

registro, se cuenta con una vasta experiencia en la captación e interpretación de las señales de un estallido nuclear.

Los ensayos nucleares generan una amplia variedad de señales que cabe detectar. Una explosión en la atmósfera, por ejemplo, emite un intenso destello luminoso que un satélite captará. El estruendo de una explosión no tarda en disiparse en las frecuencias audibles para el oído humano, pero las ondas sonoras de frecuencias "infrasónicas" —inferiores a los 20 hertz— recorren largas distancias por el aire. Postes de "escucha" infrasónica equipados con microbarómetros detectan las sutiles variaciones de presión que componen las señales infrasónicas.

En las explosiones nucleares se crean isótopos radiactivos de ciertos elementos estables. En una prueba atmosférica salen proyectados hacia la atmósfera en forma de gases. Cuando se enfrían, algunos de ellos, por ejemplo el xenón radiactivo, permanecen en fase gaseosa como signo delator de una explosión nuclear. Otros se condensan y se combinan con el polvo para formar partículas que recorren a la deriva el planeta. Ya en 1948, la Fuerza Aérea de EE.UU. vigiló las pruebas nucleares atmosféricas en el Pacífico y confirmó que las partículas radiactivas aludidas tenían un tamaño suficiente para que se las pueda recoger bombeando aire a través de un papel de filtro, similar al que se emplea para hacer café.

La validez de la detección por radioisótopos no tardó en comprobarse. El 3 de septiembre de 1949, los datos recogidos por un bombardero WB-29 que volaba al este de la península de Kamchatka probaban que, cuatro días antes, la URSS se había convertido en el segundo país que ensayaba un ingenio nuclear. La mezcla de isótopos en los residuos —especialmente plutonio y uranio 238— hablaba por sí sola: los soviéticos habían ensayado una bomba que era una copia casi exacta del explosivo de 21 kilotones que EE.UU. había dejado caer sobre Nagasaki.

El programa nuclear de EE.UU. tardó muy poco en añadir explosiones submarinas a las atmosféricas. El sonido viaja muy bien en el agua, especialmente cuando la energía sónica queda atrapada por unas leves variaciones de temperatura y salinidad que definen un "canal sónico de fijación y localización", o capa SOFAR. Quedó así patente que se podían monitorizar explosiones subacuáticas de escasas millonésimas de kilotón de rendimiento con hidrófonos, o micrófonos submarinos, siempre que se los colocara cerca de la capa SOFAR, a una profundidad marina de entre 600 y 1200 metros.

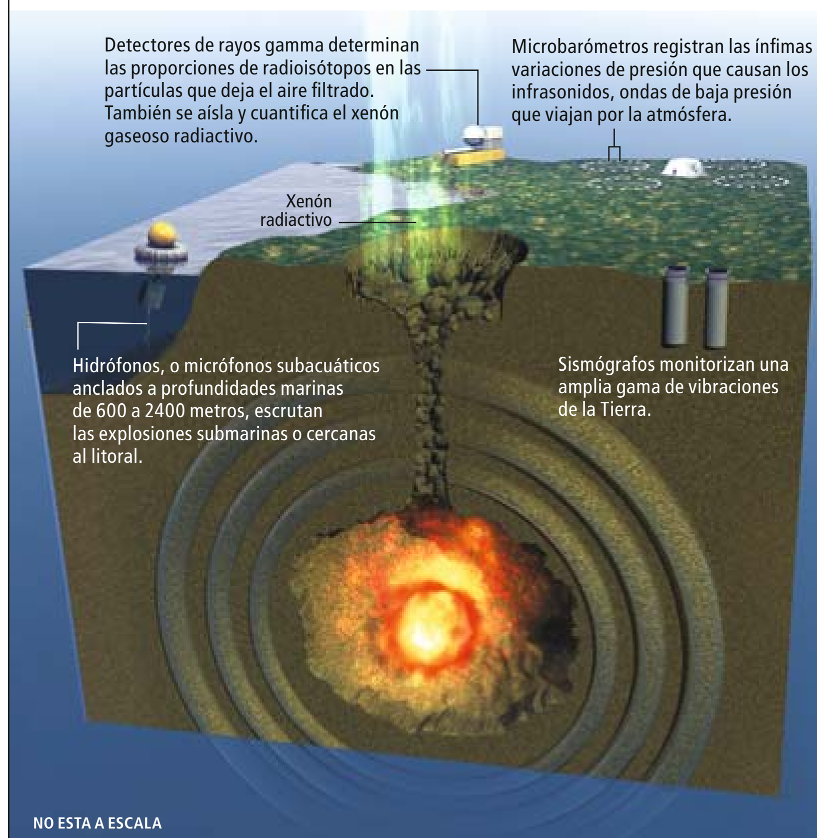
Vigilancia sísmica

En 1963, tras unas negociaciones largas e intensas, EE.UU., la URSS y el Reino Unido (los tres primeros miembros del "club nuclear") firmaban el Tratado de Prohibición Limitada de los Ensayos (TPLP), que prohibía las pruebas nucleares en el espacio ultraterrestre, en la atmósfera y bajo las aguas. Las partes del tratado, no obstante, seguían permitiendo ensayos subterráneos. Por ello, la información transportada por las ondas sísmicas —energía ondulatoria elástica que viaja por el seno de la Tierra a consecuencia de un impacto, un hundimiento, un deslizamiento, una explosión o cualquier otra fuerza que incida sobre el planeta— no tardó en convertirse en el foco de atención de los encargados de los controles.

Afortunadamente, los sensores necesarios para detectar terremotos sirven también para detectar estallidos de bombas. Pero distinguir entre terremotos y explosiones requirió algunos años. Hoy sigue perfeccionándose el método.

Técnicas de vigilancia para el Tratado de Prohibición Completa

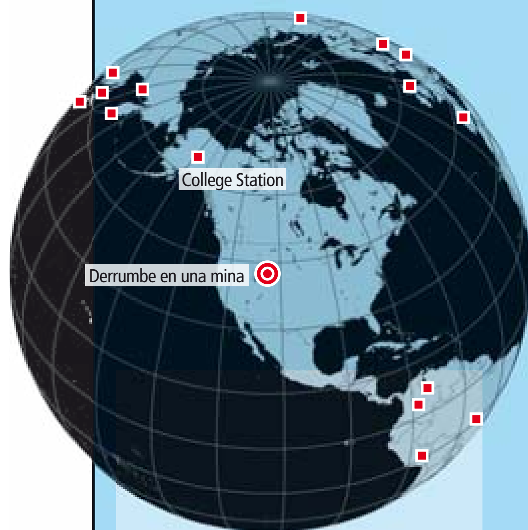
El Sistema Internacional de Vigilancia (SIV) desplegado por la Organización del Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares (OTPCE), sita en Viena, incorpora detectores de tres clases de señales características de una explosión nuclear (*abajo*), en especial de los ingenios activados bajo tierra.



ALFRED T. KAMAJIAN

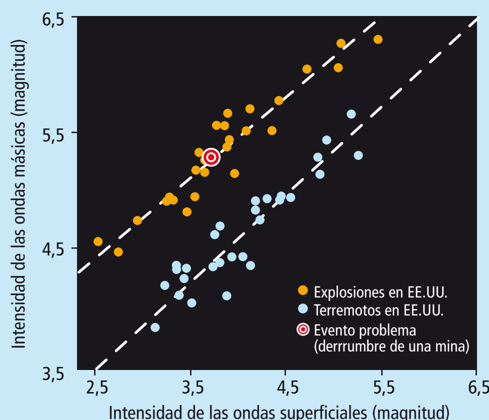
Cómo discernir entre una explosión y un accidente

Distinguir las señales sísmicas de una explosión nuclear de otros eventos sísmicos es una de las principales dificultades de la vigilancia: las identificaciones erróneas pueden acarrear falsas acusaciones e incidentes internacionales. La identificación de una diferencia sísmica fiable entre una explosión subterránea y el hundimiento de la galería de una mina ha sido un avance importante de los últimos años.



El derrumbe de una mina en el suroeste de Wyoming envió ondas másicas de largo recorrido a todo el planeta. (Las ondas másicas atraviesan el interior sólido de la Tierra.) Las ondas fueron captadas por observatorios sísmicos situados por lo menos a 3000 kilómetros de distancia (*cuadrados*).

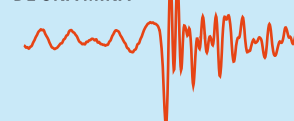
¿IDENTIDAD EQUIVOCADA?



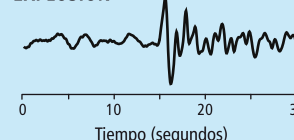
Las explosiones subterráneas (*círculos naranja*) se distinguen sin dificultad de los terremotos (*círculos azul claro*) por el valor relativo de las intensidades de ambas clases de ondas sísmicas, másicas y superficiales. El gráfico muestra que las explosiones y los terremotos tienden a caer en poblaciones separadas. Según ese criterio, no obstante, el hundimiento de una mina de Wyoming (*diana roja*) se pareció mucho a una explosión nuclear.

En un estudio más a fondo, los sismólogos observaron que el sismograma de la onda másica del hundimiento de la mina empieza con un valle profundo, mientras que el de una explosión nuclear empieza con una cresta pronunciada (*abajo*). Ambas se obtuvieron en College Station (Alaska). El movimiento descendente registrado en el sismograma del derrumbe de la mina refleja la implosión inicial de la roca que circunda el centro del episodio.

HUNDIMIENTO DE UNA MINA



EXPLOSION



MAPPING SPECIALISTS (*globo*); LILA RUBENSTEIN (*gráfica*); LUCY READING-IKKANDA (*seismogramas*); FUENTE: "DISCRIMINATING BETWEEN LARGE MINE COLLAPSES AND EXPLOSIONS USING TELESEISMIC P WAVES", POR DAVID BOWERS Y WILLIAM R. WALTER, EN *PURE AND APPLIED GEOPHYSICS*, VOL. 159, N.º 4; FEBRERO DE 2002

La dificultad principal procede de la diversidad y número de terremotos, explosiones químicas y otros fenómenos no nucleares que cada día generan señales sísmicas. Ninguna red de monitorizado de buena calidad puede librarse de captar esas señales. Más de 600 seísmos diarios de todo el mundo acaban recogidos en un resumen internacional; en las minas estallan toneladas de agentes de voladura cada año. En total, todos los días se producen unos 25 eventos sísmicos de magnitud superior a cuatro, cifra que se decuplica aproximadamente por cada unidad menos de magnitud (o sea, de 25 a 250 eventos diarios para un descenso de magnitud de cuatro a tres).

En la mayoría de los lugares de la Tierra, la magnitud 4 corresponde a un rendimiento explosivo inferior a un kilotón de un artefacto subterráneo atracado en una pequeña cavidad de roca dura, desde la cual las ondas sísmicas se propagan muy bien. En otros lugares la roca es más blanda y absorbe una porción mayor de la energía de la explosión; se reduce así la magnitud sísmica medida. A algunos políticos les ha preocupado que un país pudiera intentar reducir la señal sísmica modificando el entorno inmediato de la prueba. Pensemos que una gran cavidad vaciada en la roca podría amortiguar parcialmente las ondas sísmicas de una explosión, aunque para un ensayo militarmente útil la cavidad tendría que ser tan grande, que se hundiría, o atraería la atención por otras causas; por ejemplo, tendría que ocultarse a los satélites el material excavado. El riesgo de ser descubiertos sería muy alto.

En la práctica, el seguimiento sísmico puede detectar con una fiabilidad del 90 por ciento todas las explosiones nucleares de rendimiento superior a un kilotón, examinando del orden de 50 a 100 eventos sísmicos cada día. Para detectar explosiones nucleares de rendimientos más bajos, el número de episodios sísmicos a examinar es mayor. Incluso un kilotón, sin embargo, resulta muy poco para una explosión nuclear y, según un informe de 2002 de la Academia Nacional de Ciencias de EE.UU., una prueba de esas dimensiones sería de escasa utilidad para un país que tratara de hacerse con armas nucleares más grandes, especialmente si el país carece de una experiencia anterior suficiente en pruebas nucleares (*véase el recuadro "¿Para qué sirve un ensayo?"*).

En qué centrarse, qué ignorar

La vigilancia de las explosiones nucleares empieza con la detección de las señales, a la que sigue la tarea de reunir y relacionar todas las que procedan del mismo evento recogidas por

GUIA DE ACRONIMOS

AEDS Sistema de Detección de Energía Atómica

AFTACA Centro de Aplicaciones Técnicas de la Fuerza Aérea

TPCE Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares

SIV Sistema Internacional de Vigilancia

IRIS Instituciones Asociadas de Investigación Sismológica

TPLE Tratado de Prohibición Limitada de Ensayos

TNP Tratado de No Proliferación Nuclear.

Red mundial para la vigilancia del Tratado

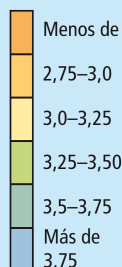
Cuando la totalidad de los 50 observatorios de la red sismológica primaria del SIV estén construidos y en pleno servicio, la red detectará explosiones nucleares en cualquier lugar del mundo que generen ondas sísmicas de magnitud 3,75 aproximadamente, sensibilidad suficiente para descubrir toda explosión nuclear que pueda rendir una información de interés militar. Pero el SIV no corre riesgos en su caza del fraude. Tal como muestra el mapa (*abajo*), la red puede captar señales sísmicas mucho más débiles, salvo para algunas partes del planeta.

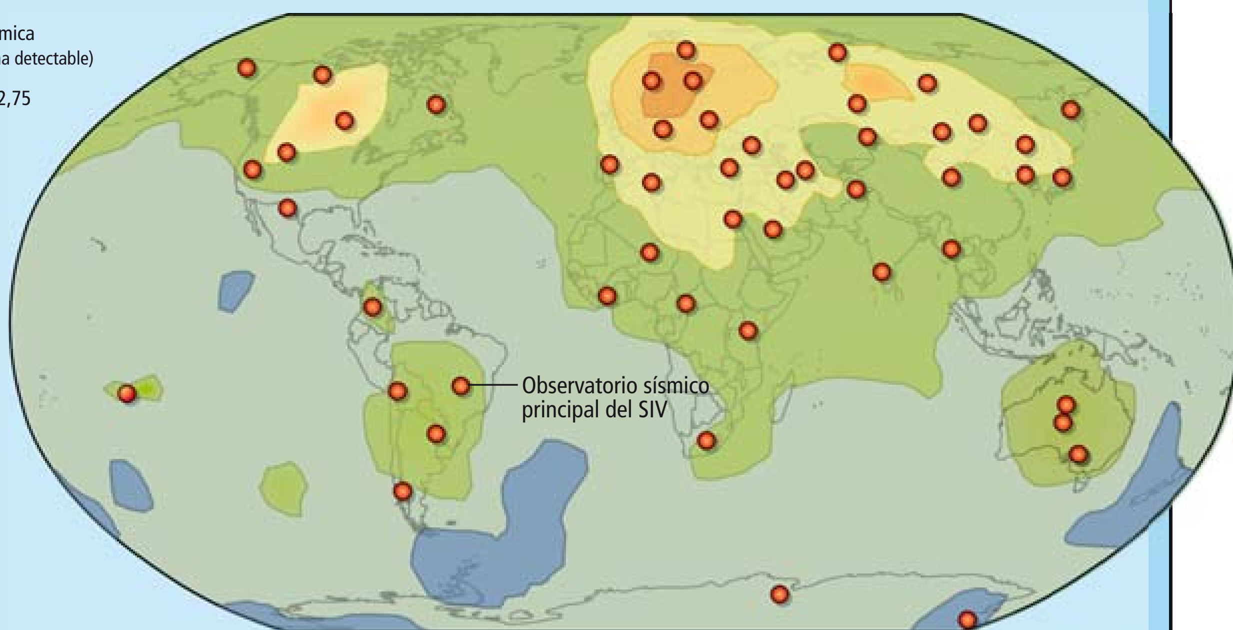
Como la intensidad de la señal sísmica depende, además del "rendimiento" explosivo, de otros factores que un estado sin escrúpulos podría manipular para ocultar una prueba, por ejemplo el tipo de roca que circunda la explosión (*tabla a la derecha*), el rendimiento suele expresarse como la masa de TNT, en kilotoneladas, que al estallar liberaría la misma energía.

Equivalentes aproximados en magnitudes sísmicas de los rendimientos de explosiones subterráneas

Magnitud sísmica	Rendimiento en roca dura (kilotones)	Rendimiento en roca blanda (kilotones)
2,75	0,005	0,04
3,0	0,01	0,08
3,25	0,03	0,2
3,5	0,05	0,3
3,75	0,1	0,6

UMBRALES DE DETECCION POR ZONAS





distintos observatorios de control. Los pasos finales son la estimación del lugar del evento, principalmente a partir de las diferencias entre los tiempos de llegada de las señales a los distintos observatorios, y la identificación de su naturaleza. Por ejemplo: ¿tenía las características de la irrupción de un meteoro en la atmósfera, de una voladura minera o de un ensayo nuclear? En la postrera opción, ¿de qué magnitud?, ¿cuál fue su rendimiento?, ¿qué país lo llevó a cabo?

Los algoritmos clasifican automáticamente la mayoría de los seísmos; el sistema informático sólo deja al hombre los casos más difíciles. Los especialistas llevan muchos años monitorizando terremotos y voladuras mineras; conocen perfectamente el modo en que sus características se reflejan en los registros sísmicos. Esta experiencia acumulada ha servido también para identificar las pruebas nucleares. Algunos tipos particulares de seísmos se convirtieron en piedras de toque cuando se elaboraron los protocolos que identifican las explosiones nucleares.

Tres hundimientos de minas, uno de 1989, en Alemania, y un par de 1995, en Rusia y EE.UU., fueron una de esas piedras de toque. Aunque los observatorios sísmicos de la red mundial detectaron los tres, se suscitaron dudas acerca de la validez del método clásico para distinguir de las explosiones los seísmos porque, al tratarse de eventos sucedidos a largas distancias, los confundió con explosiones subterráneas. Ese método clásico compara la intensidad de las ondas sísmicas, de larga longitud de onda y que se propagan por la superficie terrestre, con la intensidad de las ondas másicas, las que se adentran en las profundidades del planeta. Por ejemplo, un temblor de tierra poco profundo y una explosión subterránea podrían desencadenar ondas de la misma intensidad, pero las ondas superficiales del temblor tendrían una amplitud apreciablemente mayor que las de la explosión subterránea.

Un análisis más detallado de las ondas sísmicas generadas por los derrumbes en minas hizo ver que las de ese trío de episodios no

MAPPING SPECIALISTS

podrían haberse originado en explosiones. Se iniciaban con un valle y no con una cresta: el terreno se movió en un principio hacia adentro, en dirección al foco, y no hacia fuera, es decir, tal y como cabía esperar del derrumbe de una mina (*véase el recuadro* "Cómo discernir entre una explosión y un accidente"). Tuvo su importancia: quedó demostrada la posibilidad de distinguir entre un evento de ese tipo y una explosión subterránea, basándose exclusivamente en los registros sísmicos.

Un segundo tipo de evento ilustró la importancia de las diferencias sísmicas entre dos clases de ondas másicas a la hora de vigilar explosiones nucleares. En 1997 hubo bajo el mar de Kara una pequeña sacudida sísmica de magnitud 3,5, acompañada de una réplica aún más débil. Fue cerca del antiguo polígono nuclear ruso de la isla ártica de Nueva Zembla. ¿Estarían los rusos violando sus compromisos como firmantes del TPCE?

Las ondas superficiales generadas por el episodio eran demasiado pequeñas para medirlas fiablemente; tampoco aquí resultaba, pues, aplicable el método clásico de identificación de explosiones: comparar la intensidad de las ondas superficiales, de larga longitud de onda, con la de las ondas másicas. Pero la detección de ondas sísmicas "regionales", que atraviesan el manto superior y la corteza terrestre, mensurables hasta una distancia de millar y medio de kilómetros del evento, resolvió la cuestión. Esas ondas permitían distinguir entre las ondas de compresión, u ondas *P*, y las ondas de cizalladura, u ondas *S*, generadas por el evento. (Las ondas *P* se propagan como zonas de compresión y rarefacción alternantes en la misma dirección en que se propaga la onda; las ondas *S* oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación.)

Se sabía que las ondas *P* de una explosión son de mayor amplitud que las ondas *S*, pero esa distinción estaba sólo empezando a aplicarse a las frecuencias mayores que cinco hertz. Aquella vez, el cociente medido de las intensidades de las ondas *P* y *S* a alta frecuencia —y el hecho de que la sacudida inicial tuviera una réplica— mostraron que el episodio del mar de Kara era un terremoto.

Más vigilancia para evitar fraudes

Un tercer episodio de referencia, la explosión nuclear norcoreana del 9 de octubre de 2006, ilustró la importancia de registrar las ondas sísmicas lo más cerca posible de sus focos. El estallido dejó trazas en sensores de todo el mundo, pese a que su rendimiento se estimó en menos de un kilotón. Pero se necesitaron los datos regionales para determinar que las señales procedían de una explosión y no de un terremoto. La alerta funcionó. En las cercanías había varios observatorios sísmicos, incluido uno de la red del Sistema Internacional de Vigilancia (SIV), el sistema establecido por el TPCE para monitorizar las explosiones nucleares.

Tras la detección sísmica de la prueba norcoreana y el anuncio por las autoridades del país de que se había realizado, la presencia en Asia de sustancias radiactivas en el aire y en tierra, así como en el viento al otro lado del Pacífico, captada por un observatorio canadiense del SIV, confirmó fuera de toda duda la naturaleza nuclear de la explosión. Que se pudiera detectar esa radiactividad aumentó mucho la confianza en la capacidad de detectar explosiones. La topografía del polígono norcoreano sugiere que la explosión tuvo lugar a mayor profundidad que otras pruebas subkilotónicas. Pese a todo, hubo fuga radiactiva.

La experiencia con este y otros eventos sísmicos especiales ha demostrado que los mejores datos sísmicos para resolver un problema de inspección nuclear puede a veces proceder de observatorios no integrados en la red de monitorizado de un tratado. Esos observatorios, construidos pensando en otros fines, pueden brindar el tupido cubrimiento que posibilita consolidar las pruebas que vienen de las redes de vigilancia especializadas. Por ejemplo: en la zona de Corea los observato-

Los autores

Paul G. Richards es profesor Mellon de Ciencias Naturales del Observatorio Terrestre Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia. Desde mediados de la década de los ochenta ha centrado sus trabajos en la aplicación de métodos sísmicos al estudio de los ensayos de armas nucleares. **Won-Young Kim**, investigador también en Lamont-Doherty, se centra en el análisis de las señales sísmicas "regionales" procedentes de focos situados hasta una distancia de unos 3000 kilómetros.

¿PARA QUE SIRVE UN ENSAYO?

Aunque decidiesen correr el riesgo de tratar de evadir la vigilancia del TPCE con una prueba nuclear realizada en secreto, los países que tuviesen alguna experiencia en ensayos nucleares no aprenderían nada que agravase la amenaza nuclear que ya supongan para EE.UU., y los países sin experiencia poco más sacarían del ensayo de lo que ya hubiesen aprendido con un arma sin ensayarla. He aquí los conocimientos que los países sin experiencia podrían adquirir en función del rendimiento explosivo del ensayo:

Rendimiento (kilotones)	**¿Detectable?**	**Objeto o utilidad esperable del ensayo**
Menos de 0,0001	Improbable	Pruebas de seguridad de punto único* (con dificultad)
Entre 0,0001 y 0,01	Improbable	Pruebas de seguridad de punto único
Entre 0,01 y 1-2	Posiblemente; cabría ocultarla en ciertas circunstancias	Algunas mejoras en el peso y en la eficiencia de armas de fisión "reforzadas"†; ensayos de comprobación de armas pequeñas de hasta 2 kilotones de rendimiento
Entre 1-2 y 20	Casi siempre	Desarrollo de una arma de fisión reforzada de bajo rendimiento; desarrollo final y prueba completa de un arma (de fusión) termonuclear de bajo rendimiento; ensayos de comprobación de un arma de fisión de hasta 20 kilotones de rendimiento.

* Una prueba de seguridad de punto único pretende comprobar que no tendrá lugar una explosión nuclear aunque el explosivo químico que circunda el material fisionable se active en algún punto.

† Un arma reforzada incorpora tritio y deuterio para aumentar el número de neutrones; hay así más fisiones en el explosivo nuclear y el rendimiento es mayor.

FUENTE: *TECHNICAL ISSUES RELATED TO THE COMPREHENSIVE NUCLEAR TEST BAN TREATY* NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. NATIONAL ACADEMIC PRESS, 2002.

Cincuenta años de pruebas y controles nucleares

- **16 de julio, 1945:** Se efectúa la primera prueba de una bomba nuclear en el polígono Trinity, en Alamogordo (Nuevo México).
- **6 de agosto, 1945:** Se lanza sobre Hiroshima la primera bomba atómica; tres días después se lanza una segunda sobre Nagasaki.


TRUMAN SAYS RUSSIA SET OFF ATOM BLAST
ATOMIC BLAST IN RUSSIA
TRUMAN SAYS REDS HAVE EXPLODED ATOM

- **1947:** Por orden del general Dwight D. Eisenhower se inician los trabajos para vigilar los ensayos nucleares de otros países.
- **29 de agosto, 1949:** La URSS se convierte en el segundo país del mundo que ensaya un ingenio nuclear (también en la atmósfera).
- **3 de septiembre, 1949:** La explosión soviética es detectada por un avión norteamericano que recoge residuos nucleares en la atmósfera superior. Es la primera explosión nuclear vigilada por un país diferente del que realiza el ensayo.
- **3 de octubre, 1952:** El Reino Unido se convierte en el tercer estado con armas nucleares, al hacer estallar su primer ingenio nuclear (también en el aire).
- **Mediados de la década de los cincuenta:** Numerosos grupos nacionales e internacionales atraen la atención pública hacia los perjuicios genéticos ocasionados por los materiales radiactivos que producen las continuas pruebas nucleares.
- **19 de septiembre, 1957:** En el polígono de Nevada se realiza la primera prueba nuclear subterránea.
- **13 de febrero, 1960:** Francia ensaya su primer ingenio nuclear.
- **31 de octubre, 1961:** La Unión Soviética hace estallar el mayor artefacto jamás ensayado, "Big John", cuyo rendimiento superaba los 50 kilotones. Fue detectado de inmediato en todo el planeta.
- **5 de agosto, 1963:** El Reino Unido, EE.UU. y la URSS firman el Tratado de Prohibición Limitada de los Ensayos, que prohíbe las pruebas en la atmósfera, bajo el mar y en el espacio. China y Francia rehúsan firmar.
- **16 de octubre, 1964:** China ensaya su primer ingenio nuclear, y pasa a ser el quinto país en hacerlo.
- **1 de julio, 1968:** Sesenta y un países firman el Tratado de No Proliferación, que proscribe la transferencia de tecnología de armas nucleares a los estados carentes de armas nucleares. India, Israel, Corea del Norte y Pakistán rehúsan firmar.
- **18 de mayo, 1974:** India ensaya su primer ingenio nuclear (bajo tierra).
- **1992:** EE.UU., bajo el mandato del presidente George H. W. Bush, declara una moratoria para todos los ensayos nucleares.
- **10 de septiembre, 1996:** La Asamblea General de las Naciones Unidas vota a favor del Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares (TPCE), que proscribe todas las explosiones nucleares de prueba.
- **24 de septiembre, 1996:** El presidente Bill Clinton firma el TPCE por EE.UU. Ese mismo día, 66 países, incluidos los otros cuatro estados con armas nucleares (China, Francia, Rusia y Reino Unido), firman el tratado. India, Corea del Norte y Pakistán no firman.
- **11 y 13 de mayo, 1998:** India lleva a cabo dos series de pruebas nucleares subterráneas, rompiendo una moratoria global de facto sobre las pruebas que prevalecía desde que el TPCE recabó los primeros signatarios en 1996.
- **28 de mayo, 1998:** Reaccionando a la reanudación de las pruebas indias, Pakistán lleva a cabo dos series de ensayos nucleares subterráneos.
- **13 de octubre, 1999:** El senado de EE.UU. vota retirar su "consejo y consentimiento" al TPCE
- **2001:** A poco de jurar el cargo, el presidente George W. Bush manifiesta que el TPCE no se halla entre los intereses de EE.UU. El mandatario prosigue con la moratoria de las pruebas nucleares.
- **9 de octubre, 2006:** Corea del Norte ensaya su primer ingenio nuclear (bajo tierra).
- **31 de diciembre, 2008:** 180 países han firmado el TPCE, incluidos 41 de los 44 países que deben firmarlo antes de que pueda entrar en vigor, entre ellos España. Sólo India, Corea del Norte y Pakistán mantienen su negativa.



rios abundan tanto, que pueden detectarse explosiones bajo tierra de sólo una pequeña fracción de kilotón.

Ya existen, independientes del SIV, redes de observatorios sísmicos comprobadas que analizan, ensamblan y distribuyen rápidamente grandes cantidades de información sísmica. Diseminados por todo el mundo se encuentran miles de sismómetros instalados para evaluar los peligros de terremotos y determinar la estructura interna de nuestro planeta. En EE.UU., el Servicio Geológico y las Instituciones Asociadas de Investigación Sismológica (IRIS), un consorcio formado por más de cien universidades, colaboran para construir y explotar sistemas de información sísmica. Desde fines de 2008, el IRIS viene recibiendo información sísmica actualizada de 71 redes que suman 1790 observatorios en servicio, de ellos 474 fuera de EE.UU.

Un grupo internacional, la Federación de Redes Sísmicas Digitales, desempeña un papel de enorme peso en la recogida de datos, y su importancia aún sigue creciendo. Esas redes son perfectamente idóneas para captar ensayos nucleares no previstos, así como señales zonales de alta calidad procedentes de eventos que, de ser analizados por una sola red, despertarían sospechas. Así, esos datos pueden complementar los procedentes del SIV y de las distintas redes nacionales de vigilancia para el cumplimiento de tratados.

Una red de especial interés es el sistema de monitorizado que EE.UU. aún mantiene específicamente para detectar explosiones nucleares. Del Sistema de Detección de Energía Atómica (EADS) se encarga el Centro de Aplicaciones Técnicas de la Fuerza Aérea (AFTAC), en la Base Patrick de la Fuerza Aérea en Florida; incluye una extensa red global de sismómetros. El AFTAC informa sobre los datos procedentes de la red del EADS sólo al gobierno de EE.UU. Si finalmente el TPCE entrase en vigor y el EADS o algún otro complejo nacional detectase un evento sospechoso, esos datos podrían presentarse ante un foro internacional, incrementando así la información reunida por el SIV.

¿Hasta dónde descender?

Aunque las técnicas disponibles permiten descubrir pruebas nucleares de escasa potencia, y aunque proseguirán los avances en el monitorizado, hay que hacer una salvedad práctica: no es posible detectar explosiones de cualquier magnitud escala abajo hasta el rendimiento cero con una fiabilidad del cien por cien. En ese sentido, la vigilancia es imperfecta. Pero, ¿importa que un país técnicamente avanzado pudiera acaso ocultar al resto del mundo una

KEYSTONE/GETTY IMAGES (*periódico*); BETTMANN/CORBIS (*explosión*)

Breve historia del TPCE

El Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares (TPCE) guarda relación directa con el Tratado de No Proliferación Nuclear (TNP), que entró en vigor en 1970 y al que ahora están adheridos más de 180 países. Al firmar el TNP, los países se comprometen a no permitir el traspaso de tecnología de armas nucleares desde los países que poseen esa tecnología hacia los carentes de ella.

Durante las negociaciones del TNP, la mayoría de los estados no nucleares deseaban un conjunto de compromisos complementarios por parte de los países nucleares, para que éstos no desarrollaran todavía más su técnica nuclear. El TPCE es, de esos compromisos, el más detallado y de mayor alcance. No obstante sus muchos signatarios, el TPCE no puede entrar en vigor mientras no sea firmado y ratificado por 44 países que, durante las negociaciones, se entendía que poseían capacidad de manejar reactores nucleares. A comienzos de 2009, 35 de esos 44 países lo habían ratificado ya, incluidos Rusia y casi todos los miembros de la OTAN, entre ellos España. Entre los nueve que quedan fuera, hay seis que lo firmaron, pero no lo ratificaron (China, Egipto, Indonesia, Irán, Israel y EE.UU.) y tres que ni siquiera lo han firmado (India, Corea del Norte y Pakistán).

En 1999, la derrota del TPCE en el Senado de EE.UU. mandó el tratado al limbo en que hoy sigue en EE.UU. Cuando George W. Bush inició su mandato, no revocó la firma de Bill Clinton (*derecha*), pero manifestó su oposición al tratado. La administración Bush, además, recortó la participación de EE.UU. en la financiación del Sistema Internacional de Vigilancia del TPCE. Mientras Bush siguió en el cargo no hubo jamás posibilidad de que el tratado se presentara a la reconsideración del pleno del Senado. Con nuevas informaciones, empero, incluidas las aportaciones de la administración Obama, el Senado podría reconsiderar el tratado y proceder a una segunda votación.



GREG GIBSON *AP Photo*

explosión nuclear muy pequeña, aun cuando ésta no sirviera para nada práctico en un programa de armas nucleares? El propósito de los sistemas de monitorizado es garantizar que las explosiones nucleares de prueba secretas deban ser tan poco potentes, que carezcan de interés militar.

En los años cincuenta, el presidente Dwight D. Eisenhower se mostró dispuesto a aceptar una prohibición absoluta de las pruebas aunque la vigilancia no fuera lo bastante sensible para detectar explosiones de rendimientos inferiores a unos pocos kilotones. Actualmente, el seguimiento es mucho más eficaz. ¿Vale la pena echar por tierra el TPCE porque un ingenio nuclear inferior a un kilotón pudiera en principio hacerse estallar sin que fuera detectado? El análisis de 2002 de la Academia Nacional de Ciencias alega, por el contrario, que la ratificación del TPCE sería un hecho positivo para la seguridad nacional de EE.UU.

Algunos altos responsables de las Fuerzas Armadas y de los laboratorios de armas nucleares se han opuesto al TPCE. Aducen que éste impide a EE.UU. verificar de continuo la viabilidad de su arsenal nuclear actual o desarrollar unas armas nucleares más perfeccionadas. Pero la fiabilidad de los diseños comprobados que hay en los arsenales nucleares de Estados Unidos no dependen, en la práctica, de un programa de pruebas nucleares. Esa fiabilidad la aseguran los ensayos no explosivos cuya limitación queda fuera del TPCE. Con relación a nuevas armas nucleares, el TPCE es un impedimento —tal como se pretendía— y sus restricciones sobre las armas que pudiera desarrollar EE.UU. deben sopesarse políticamente respecto a los beneficios de las restricciones que impone a todos los signatarios.

Aquí nos hemos referido a varios aspectos técnicos del desarrollo y monitorizado de armas, pertinentes a la hora de juzgar si EE.UU. debe ratificar el TPCE. Por desgracia, personas y organizaciones con opiniones firmes sobre el TPCE convierten a veces los aspectos técnicos —en especial la eficacia de la vigilancia— en una batalla que se libra en vez de la que correspondería, la de la evaluación política global del tratado en sí y de las soluciones de compromiso que implica. Nosotros, en cambio, instaríamos a que el debate principal se centrase en los méritos del tratado y no se mezclase con la evaluación profesional de lo que la vigilancia puede dar de sí.

Si el TPCE termina por entrar en vigor, la moratoria de facto de los ensayos quedaría formalmente instaurada. El tratado podría entonces convertirse en lo que siempre se pretendió que fuese: un paso vital para afianzar el empeño mundial por evitar la proliferación de las armas nucleares y una nueva carrera armamentística nuclear.

Bibliografía complementaria

TECHNICAL ISSUES TO THE COMPRENSIVE NUCLEAR TEST BAN TREATY. National Academy of Sciences. National Academies Press, 2002.

TOWARD A NUCLEAR-FREE WORLD. George P. Shultz, William J. Perry, Henry A. Kissinger y Sam Nunn en *Wall Street Journal Commentary*; 15 de enero, 2008.

CTBT MONITORING: A VITAL ACTIVITY FOR OUR PROFESSION. Paul G. Richards en *Seismological Research Letters*, vol. 79, n.º 3, págs. 375-378; mayo 2008.

THE COMPREHENSIVE TEST BAN TREATY: EFFECTIVELY VERIFIABLE. David Hafemeister en *Arms Control Today*, vol. 38; octubre 2008.

Para más información acerca de las técnicas de seguimiento, historia de los ensayos nucleares, el desarrollo del TPCE y la Comisión Preparatoria para la Organización del TPCE en Viena, visite www.ctbto.org.

NUEVAS TACTICAS CONTRA LA TUBERCULOSIS

La pandemia se extiende por muchos lugares. Aparecen cepas resistentes a todos los fármacos. Para revertir esta tendencia, se aplican múltiples estrategias farmacológicas de vanguardia

Clifton E. Barry III y Maija S. Cheung

CONCEPTOS BASICOS

- La tuberculosis es la segunda causa de muerte por infección en el mundo, tras el VIH. La pandemia está aumentando en muchos lugares.
- La tuberculosis está producida por una bacteria. La mayoría de los casos son tratables, pero aumentan las cepas resistentes a los fármacos de primera y segunda línea.
- A menudo fracasan las estrategias habituales en el desarrollo de antibióticos y vacunas contra la enfermedad.
- La aplicación de nuevas herramientas ha permitido estudiar con mayor detalle la bacteria tuberculosa, ofreciendo una visión sin precedentes de las interacciones entre el patógeno y el huésped. Los resultados obtenidos sugieren nuevas dianas farmacológicas.

La peste bubónica, la viruela, la polio, el VIH... el camino de la historia está salpicado de enfermedades que han modelado en cada momento la atmósfera social, definido los objetivos de la ciencia y la medicina, y segado cabezas poderosas de forma prematura. Pero hay una enfermedad que ha acechado a la humanidad durante más tiempo que cualquier otra: la tuberculosis. El registro fósil indica que la tuberculosis viene afectando a los humanos desde hace más de medio millón de años. Nadie está a salvo. Ataca a ricos y pobres, jóvenes y viejos, a quienes se arriesgan y a quienes se abstienen. Sólo con toser, escupir o hablar, una persona infectada disemina la bacteria tuberculosa.

La tuberculosis ocupa hoy el segundo lugar entre los asesinos infecciosos en todo el mundo, por detrás del VIH. Mata a unos dos millones de personas al año, a pesar de que existen fármacos que curan la mayoría de los casos. El problema es que mucha gente no tiene acceso a los medicamentos y quienes lo tienen a veces no completan el prolongado tratamiento que requiere la enfermedad.

Además, la tuberculosis evoluciona con mayor celeridad que las terapias. En los últimos años, se ha observado un preocupante aumento del número de casos resistentes a más de uno de los fármacos de primera línea que se utilizan en el tratamiento. Todavía más alarmante ha sido la aparición de cepas resistentes a todos y cada uno de los antibióticos.

La tuberculosis resulta devastadora sobre todo en los países en vías de desarrollo: allí se dan el 90 por ciento de los casos y el 98 por ciento de los fallecimientos. Más allá del sufrimiento y del dolor indescriptibles que produce, la tuberculosis perjudica gravemente la economía. Un 75 por ciento de los casos afecta a personas de entre 15 y 54 años; se calcula que la enfermedad supondrá para los países más pobres unas pérdidas de entre 1 y 3 billones de dólares en el próximo decenio. Es más, la enfermedad obliga a esos países a desviar hacia la atención sanitaria recursos preciosos de otras áreas asimismo imprescindibles.

Pero el mundo desarrollado se equivocaría si se considerara a salvo; aunque la incidencia es, en comparación, menor, la situación cambiaría si las cepas altamente resistentes ganaran terreno.

Aunque el panorama resulta desolador, hay motivos para la esperanza. Técnicas biomoleculares de punta permiten estudiar, con una precisión desconocida hasta ahora, las complejas interacciones que se establecen entre la bacteria tuberculosa y el hospedador. Por esa vía se ha llegado al desarrollo de nuevas pruebas diagnósticas y tratamientos farmacológicos.



LA PESTE MODERNA. **La tuberculosis mata cada año a unos dos millones de personas e infecta a unos ocho millones más. La fotografía muestra un enfermo de Mumbai (India), que sufre una variedad altamente resistente a los fármacos.**

JAMES NACHTWEY VII

Un éxito fugaz

Mycobacterium tuberculosis (*Mtb*), la bacteria en forma de bastón que causa la tuberculosis, fue identificada en 1882 por Robert Koch. Existe en forma latente y activa. En la infección latente, el sistema inmunitario impide que las bacterias se multipliquen y dañen los tejidos. El hospedador no presenta síntomas ni contagia. El *Mtb* puede persistir durante meses, años o incluso decenios sin multiplicarse ni hacer que su huésped enferme. Pero el diez por ciento de las personas infectadas desarrollan la forma activa, sobre todo las que presentan un sistema inmunitario débil (niños, portadores del VIH o pacientes que reciben quimioterapia).

En personas con tuberculosis activa, la bacteria vence al sistema inmunitario, se multiplica con prontitud y se disemina para atacar a los órganos. Al tratarse de una bacteria aerobia (medra en entornos ricos en oxígeno), el *Mtb* muestra una afinidad especial por los pulmones. Un 75 por ciento de los pacientes con tuberculosis activa tienen la variedad pulmonar de la enfermedad. Conforme la bacteria se multiplica, destruye el tejido pulmonar y provoca en el huésped la aparición de tos intensa, dolor torácico, esputo con sangre y otros síntomas.

No obstante, otros órganos son también vulnerables. De hecho, la tuberculosis activa puede afectar a casi todos los órganos del cuerpo. En los niños, daña el sistema cerebroespinal y causa fiebre alta y shock sistémico (meningitis). Sin tratamiento, la mitad de la gente con tuberculosis activa muere, en su mayoría por destrucción de los pulmones.

Hace un siglo se carecía de medidas para combatir la tuberculosis. Apenas se frenaba su difusión mediante el ingreso de los enfermos en sanatorios. Por aquel entonces la tuberculosis, llamada también “consunción”, se hallaba ampliamente difundida, incluso en zonas donde su incidencia es hoy limitada, como Norteamérica y Europa occidental. Los científicos comenzaron a vencer a la enfermedad en 1921, cuando empezó a administrarse una vacuna preparada por los inmunólogos franceses Albert Calmette y Camille Guérin, del Instituto Pasteur de París. Al principio se pensó que protegía de la forma infantil y de la adulta de la enfermedad, pero más tarde se vio, mediante extensas series de ensayos, que la vacuna BCG, como se la conoce, confería protección sólo frente a formas infantiles graves.

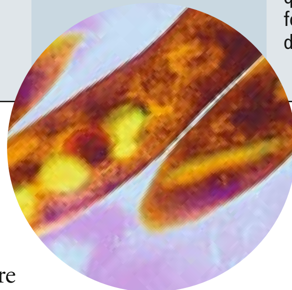
Veintidós años más tarde, un grupo encabezado por el microbiólogo estadounidense Selman Waksman descubrió la estreptomicina. Aunque causaba algunos efectos secundarios, fue la primera terapia eficaz frente a la tuberculosis. La hazaña de Waksman abrió la

HOMBRE *VERSUS* MICROORGANISMO

La tuberculosis ha causado estragos en la especie humana a lo largo de milenios. Se muestran aquí algunos momentos clave de la larga lucha entre el hombre y el patógeno.

HACE 500.000 AÑOS
En esta época, la tuberculosis comenzó a infectar a los antepasados de los humanos.

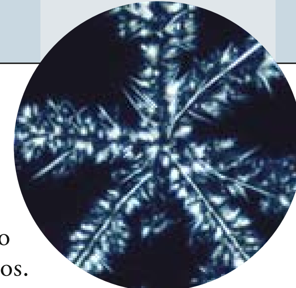
1882
Robert Koch identifica a *Mycobacterium tuberculosis* (Mtb) como el agente causal de la tuberculosis.



1908
Albert Calmette y Camille Guérin desarrollan la vacuna antituberculosa BCG. Se comprueba luego que protege sólo frente a formas infantiles graves de la enfermedad.

1921
La vacuna BCG comienza a utilizarse de forma masiva.

1943
Un grupo de investigación encabezado por Selman Waksman desarrolla el primer antibiótico contra la tuberculosis: la *estreptomicina*.



puerta al desarrollo, en los años cincuenta, de una rápida sucesión de antibióticos que compensaron las limitaciones de la estreptomicina.

Todos esos descubrimientos llevaron al cierre de los sanatorios y a un notable descenso de la incidencia de la tuberculosis en los países que disponían de dinero e infraestructuras para abordar el problema. En los años setenta, numerosos expertos consideraron erradicada la tuberculosis. Sin embargo, con la multiplicación de los viajes internacionales, empezaron a emerger las mayores epidemias. Para empeorar las cosas, el problema azotó con mayor fuerza a quienes peor podían afrontarlo: los habitantes de los países deprimidos, que hubieron de hacer frente a un nuevo asesino, el VIH.

Hoy, más de medio siglo después de la aparición del primer fármaco antituberculoso, la Organización Mundial de la Salud calcula que un tercio de la población, más de dos mil millones de personas, está infectada con el *Mtb*. Por término medio, cada año ocho millones de esos portadores desarrollarán una tuberculosis activa y cada uno de ellos infectará entre diez y quince individuos más, con lo que se mantiene la pandemia.

La situación resulta más alarmante todavía si se considera la incidencia creciente del VIH. Las personas que padecen una tuberculosis latente y son VIH positivas, tienen entre treinta y cincuenta veces más probabilidades de desarrollar una tuberculosis activa que los VIH negativos, pues el virus del sida impide que el sistema inmunitario detenga la tuberculosis. La tuberculosis constituye la principal causa de muerte entre los individuos VIH positivos: quita la vida a uno de cada tres en todo el mundo y a uno de cada dos en el Africa subsahariana, donde la atención sanitaria es deficiente.

Aunque los enfermos VIH positivos tengan acceso a fármacos antituberculosos, su salud se deteriora porque muchas veces se producen interacciones nocivas entre la terapia antirretroviral y los antituberculosos de primera línea, que fuerzan a los pacientes a suspender el tratamiento antirretroviral hasta que se controla la tuberculosis.

VICTIMAS FAMOSAS

La tuberculosis ha segado la vida de numerosas personalidades. Entre ellas:

Las tres hermanas Brontë

Anton Chekhov

Frederic Chopin



John Keats

Luis XIII de Francia



Molière

George Orwell



El Cardenal Richelieu

Jean-Jacques Rousseau

Erwin Schrödinger

Henry David Thoreau

El último reto

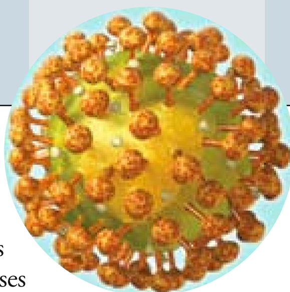
Quizás el aspecto más inquietante de la presente pandemia sea el problema creciente de la resistencia del bacilo tuberculoso a los antibióticos. ¿Cómo se ha llegado a esta situación? La respuesta se halla en la mala aplicación del tratamiento. La pauta terapéutica habitual, desarrollada en los años sesenta del siglo pasado, consiste en la administración de cuatro fármacos descubiertos unos años antes: isoniacida, etambutol, pirazinamida y rifampicina. Los pacientes que siguen esta pauta medicamentosa toman una media de 130 dosis de esos fármacos, preferentemente bajo supervisión médica. Esta combinación resulta extremadamente eficaz frente a la tuberculosis activa y sensible a los fármacos, siempre que se completen entre seis y nueve meses de tratamiento.

Las cepas resistentes a los fármacos se desarrollan cuando los pacientes abandonan el protocolo, bien porque empiezan a sentirse mejor o porque se interrumpe el suministro de medicamentos. Un mal uso de los antibióticos da a la bacteria tiempo suficiente para evolucionar hacia una forma resistente. Una vez se ha desarrollado en el hospedador una cepa resistente, el sujeto puede propagarla a otros. Por ese motivo, algunas autoridades sanitarias afirman que es mejor no acometer un tratamiento que hacerlo de forma incompleta.

Según la Organización Mundial de la Salud, el cinco por ciento de los ocho millones de nuevos casos de tuberculosis, más o menos, que aparecen cada año se deben a cepas de *Mtb* resistentes a los dos fármacos de primera línea habituales: la isoniacida y la rifampicina. La mayoría de los casos de tuberculosis multifarmacorresistente (TB-MFR) admiten tratamiento, pero requieren una terapia de más de dos años con fármacos antituberculosos de segunda línea, que causan graves efectos secundarios. Además,

SCIENCE SOURCE *Photo Researchers, Inc. (bacteria de la tuberculosis)*; DAVID PARKER *Photo Researchers, Inc. (estreptomicina)*; ROGER HARRIS *Photo Researchers, Inc. (VIH)*; MICHAEL NICHOLSON *Corbis (Luis XIII)*; THE GALLERY COLLECTION *Corbis (Chopin)*; THE GRANGER COLLECTION *(Orwell)*

AÑOS SESENTA	AÑOS SETENTA	1981	1998	2005	2006
Se desarrolla el tratamiento antituberculoso actual, que combina durante un período de seis a nueve meses cuatro fármacos.	Se piensa que la tuberculosis pronto estará erradicada.	Se identifica el VIH, que aumenta la vulnerabilidad a la tuberculosis.	Se secuencia el genoma del bacilo tuberculoso.	La Agencia Federal de Fármacos y Alimentos estadounidense aprueba un test diagnóstico mejorado de la tuberculosis.	Brote de una forma de tuberculosis extremadamente resistente a los medicamentos en KwaZulu-Natal, Sudáfrica.



el tratamiento de la TB-MFR cuesta unas mil cuatrocientas veces más que el tratamiento estándar. Ya que la mayoría de los casos de TB-MFR ocurre en los países más desfavorecidos, ese tratamiento tan costoso no constituye una opción atendible. Los diagnósticos erróneos y el elevado coste del tratamiento hacen que sólo un dos por ciento de los casos de TB-MFR en todo el mundo se traten de forma apropiada.

Peor ha sido la aparición, en los últimos años, de una forma más peligrosa todavía: la tuberculosis extremadamente resistente a los fármacos (TB-XRF). Este tipo, que apareció en 2006 tras un brote en KwaZulu-Natal, en Sudáfrica, es resistente a todos los fármacos de segunda línea. Aunque la TB-XFR no es tan habitual como la TB-MFR, la posibilidad de que evolucione y se extienda constituye una amenaza allí donde se emplean fármacos de segunda línea. La Organización Mundial de la Salud ha confirmado casos en 49 países hasta junio de 2008. Y las cifras subirán, pues son pocos los países que cuentan con laboratorios equipados para diagnosticar la TB-XFR.

Fármacos experimentales

Decir que los científicos se equivocaron al creer que los fármacos de primera línea desarrollados en los años cincuenta del siglo pasado bastarían para combatir la tuberculosis es quedarse corto. Sin embargo, dado que la mayoría de los enfermos tuberculosos se concentraba en algunos de los países más pobres del mundo, los laboratorios farmacéuticos no habían tenido aliciente alguno para invertir en investigación y desarrollo de nuevos medicamentos.

Los principales grupos farmacéuticos siguen pensando que el coste del desarrollo de un fármaco (entre 115 y 240 millones de dólares y entre siete y diez años) supera con creces el mercado global potencial para el producto.

Sin embargo, gracias a programas gubernamentales y a organizaciones filantrópicas privadas, como la Fundación Bill y Melinda Gates, se están empeñando notables esfuerzos en la fabricación de antibióticos antituberculosos que traten casos farmacorresistentes y reduzcan la duración del tratamiento de los casos normales.

Merced a tales iniciativas, han comenzado los primeros ensayos clínicos con medicamentos prometedores. Uno de ellos, el SQ109, inhibe la síntesis de la pared celular. En fecha reciente ha completado con éxito la fase I (seguridad) de los ensayos clínicos. Otro fármaco candidato es el PA-824, un compuesto cuya capacidad de atacar al *Mtb*, en su estado de división activa así como de crecimiento lento, hace pensar que reducirá de manera significativa la duración del tratamiento. El PA-824 se halla en la fase II de ensayos clínicos y ha obtenido buenos resultados.

Por desgracia, las estadísticas operan en contra de esos candidatos. A lo largo del tiempo se han aprobado menos del diez por ciento de los antibióticos que han iniciado los ensayos clínicos. Esa tasa de éxito se debe en su mayor parte a una estrategia de investigación anticuada. Hace quince años, el desarrollo de un antibiótico seguía una fórmula sencilla: había, primero, que identificar enzimas esenciales para la supervivencia de las bacterias y sin homólogo en humanos; luego, buscar en las bibliotecas químicas inhibidores potentes de estas enzimas; después, sintetizar derivados de estos inhibidores y, por fin, optimizar sus propiedades farmacológicas (la capacidad para pasar del estómago al torrente sanguíneo, entre otras). Con este método, incluso las grandes compañías farmacéuticas, maestras en el desarrollo de medicamentos para tratar casi cualquier enfermedad, han cosechado notables fracasos.

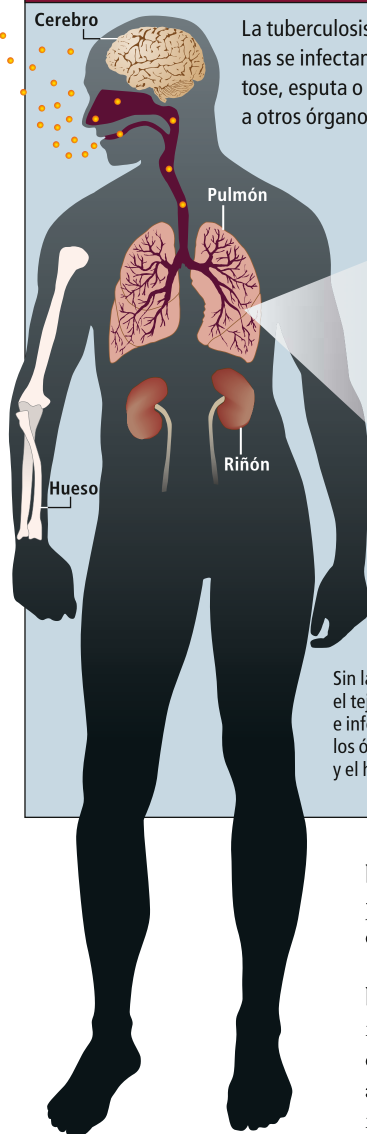
El campo de batalla de la tuberculosis se encuentra sembrado de cadáveres pertenecientes a fármacos candidatos que fracasaron en su misión. Muchos de estos compuestos correspondían a inhibidores muy potentes y altamente específicos de las enzimas tuberculosas clave. Unos, si bien destruían enzimas aisladas, fallaban cuando se ensayaban en células bacterianas. Otros, inhibían las bacterias *in vitro*, pero no *in vivo* (cuando se ensayaban en animales infectados). La tuberculosis ofrece quizás el ejemplo más claro de desconexión entre los efectos *in vitro* e *in vivo* de los anti-

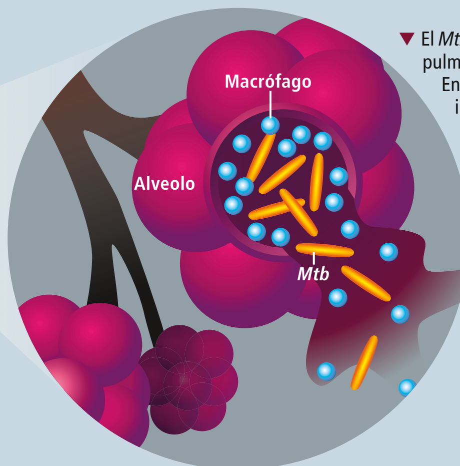
EN CIFRAS

- Un tercio de la población mundial está infectada por la bacteria tuberculosa. De esos enfermos, **uno de cada 10** desarrollará la enfermedad.
- Por término medio, casi **cuatro de cada 10** casos de tuberculosis no son correctamente detectados ni tratados.
- La tuberculosis es responsable de una muerte **cada 20 segundos**.
- Se calcula que cada año aparecen **490.000** casos nuevos de tuberculosis resistentes a los fármacos de primera línea y 40.000 casos resistentes a los de segunda línea.

AIRE ENFERMO

La tuberculosis, producida por la bacteria *Mycobacterium tuberculosis* (*Mtb*), se presenta en forma latente y activa. Las personas se infectan al respirar bacterias *Mtb* (aunque sean unas pocas) lanzadas al aire cuando alguien con una tuberculosis activa tose, esputa o habla. La *Mtb* produce tos, el síntoma más conocido, porque se acumula en los pulmones, pero afecta también a otros órganos (*figura*).





▼ El *Mtb* tiende a concentrarse en los sacos aéreos (alveolos) pulmonares porque prefiere los medios ricos en oxígeno. En la mayoría de las personas, el sistema inmunitario impide la multiplicación bacteriana: dirige las células defensivas (macrófagos) al lugar de la infección, donde forman una barrera alrededor de las bacterias. En un diez por ciento de los individuos infectados, el *Mtb* rompe esta barrera y comienza a multiplicarse.

▼ La exploración pone de manifiesto la infección pulmonar por Mtb.



Sin la acción restrictiva del sistema inmunitario, las bacterias destruyen el tejido pulmonar. Algunas siguen su viaje por el torrente circulatorio e infectan otras partes del cuerpo: cerebro, pulmones y huesos. A veces, los órganos afectados se hallan tan dañados, que dejan de funcionar y el huésped muere.

CORTESIA DE CLIFTON E. BARRY III (*radiografía torácica*); MELISSA THOMAS (*ilustraciones*)

bióticos. La mayoría de las veces se desconoce por completo el motivo del fallo del fármaco candidato.

El quid de la cuestión radica en que las bacterias corresponden a formas vivas autónomas, seleccionadas evolutivamente por su capacidad de adaptación y respuesta a las agresiones externas. Al igual que los aviones modernos, cuentan con todo tipo de sistemas alternativos y de repetición, a prueba de fallos y con capacidad para realizar copias de seguridad. Tal y como decía el personaje de Jeff Goldblum en *Parque Jurásico*, la vida encuentra un camino. Mientras no comprendamos la complejidad de las interacciones entre la tuberculosis y los humanos, seguirá siendo muy difícil obtener fármacos antituberculosos. La buena noticia es que estamos avanzando en ese frente.

Resultados de las "ómicas"

Un punto de inflexión en nuestro conocimiento sobre la tuberculosis se produjo en 1998 con la secuenciación del genoma del *Mtb*, proyecto en el que participó uno de nosotros (Barry). La secuencia, y las de organismos emparentados, ha constituido una fuente inagotable de ideas. Quizás el resultado más importante haya sido comprobar que de todas las enzimas y reacciones químicas necesarias para que la tuberculosis se mantenga en el hombre, habíamos tenido en cuenta sólo un tercio de las mismas en nuestros ensayos *in vitro*. Aprendimos que el *Mtb* empleaba buena parte de su genoma en la codificación de proteínas que sintetizan y degradan lípidos, lo que alimentaba la esperanza de que algunas pudieran considerarse dianas terapéuticas.

El análisis del genoma de esta bacteria sugirió también que, contrariamente a lo que se pensaba, el microorganismo podía vivir sin problemas en medios anóxicos, hipótesis que ya se ha comprobado. En condiciones anaerobias, el metabolismo del Mtb se ralentiza, lo que reduce su sensibilidad a los antibióticos. Identificar los elementos metabólicos que continúan activos bajo esas circunstancias constituye una de las principales estrategias encaminadas a acortar la duración del tratamiento antituberculoso.

Trasladar los resultados de las investigaciones genómicas al hallazgo de terapias antituberculosas que ayuden a salvar vidas no ha resultado fácil ni directo. Con todo, en fecha reciente se han logrado avances notables en el desarrollo de pruebas diagnósticas. Las dificultades del diagnóstico se deben a los efectos de la vacuna infantil, que se aplica a más de la mitad de los niños de todo el mundo. La

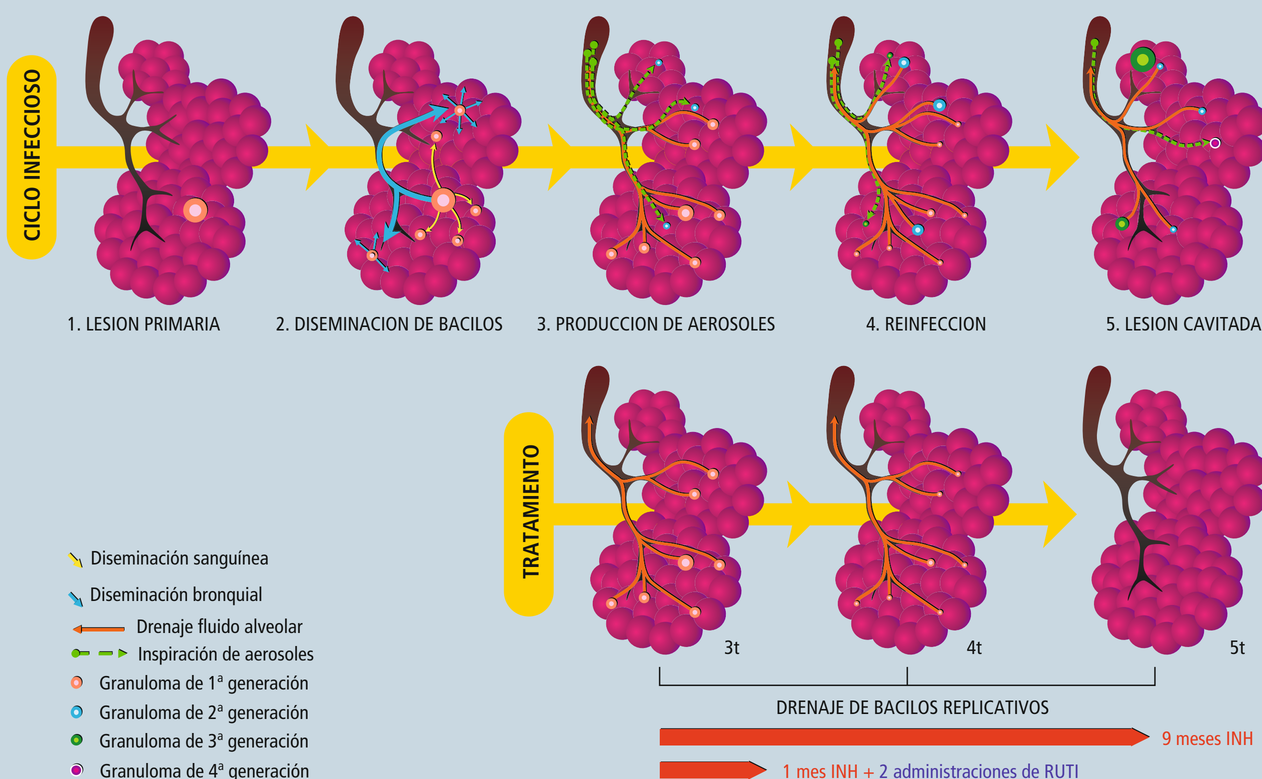
TERAPIA COMBINADA PARA LA TUBERCULOSIS LATENTE

Se ha descubierto que en la infección latente causada por *Mycobacterium tuberculosis* los bacilos no están "dormidos", como se pensaba, sino que libran una batalla constante contra el hospedador. Una vez generada la lesión primaria (*1*), los bacilos en multiplicación se diseminan a través de la circulación sanguínea o, localmente, vía árbol bronquial (*2*). Al multiplicarse, el bacilo destruye los macrófagos alveolares (MA) y genera un medio extracelular necrótico, donde finalmente va a parar. Este medio resulta muy estresante para el bacilo, que deja de crecer y de replicarse.

El estado no replicativo puede revertir cuando el bacilo es fagocitado por un MA no activado; en caso de ser fagocitado por un MA activado, el estado no replicativo le permite resistir los mecanismos bactericidas del macrófago.

Tras desplegarse la respuesta inmunitaria, en que se activan todos los MA infectados, termina la multiplicación bacilar. Para sobrevivir, el bacilo debe persistir en su estado no replicativo en el tejido necrótico de la lesión (granuloma) o bien en el interior de los MA que drenan hacia el espacio alveolar los restos de células necróticas. Arrastrados por el fluido alveolar, los bacilos alcanzan el espacio bronquial superior, para su deglución y destrucción en el estómago (*3*). Sin embargo, dado que en este espacio se generan los aerosoles que acondicionan el aire seco y frío que inspiramos, los bacilos no replicativos pueden regresar durante la inspiración al alveolo pulmonar, donde infectan nuevos MA inactivos y generan una nueva lesión (*4*).

En este proceso de constante reinfección, cabe la posibilidad de que el nuevo foco infectivo se desarrolle en los lóbulos pulmonares superiores. Allí la respuesta inflamatoria es tardía y exagerada, con lo que provoca la destrucción de los tejidos y la formación de las cavidades típicas de la tuberculosis (*5*).



MAYOR CONTROL DE LA REINFECCION

En la actualidad, el tratamiento de la tuberculosis latente se basa en la administración de isoniacida (INH), un antibiótico que destruye los bacilos en fase de multiplicación activa. Con ello se evita la reinfección constante y se acaban drenando todos los bacilos no replicativos (*3t-5t*). Sin embargo, debido a la lentitud del drenaje, el tratamiento debe extenderse nueve meses; un tratamiento más corto no resulta eficaz porque, para eliminar el riesgo de reinfección, deben drenarse del tejido necrótico todos los bacilos no replicativos. Asimismo, al destruirse los bacilos replicativos, se elimina la presencia de linfocitos T específicos circulantes, encargados de identificar focos de reinfección incipientes.

Se ha planteado una terapia combinada, que evita la eliminación de la respuesta inmunitaria específica: la administración de una vacuna tras una pauta corta de antibiótico (isoniacida). La vacuna desarrollada (RUTI®) se fabrica a partir de fragmentos de bacilos no replicativos. Permite reconocer antígenos de bacilos en replicación o no replicativos, lo que aumenta la eficacia del control de la reinfección. Reduce de nueve meses a un mes la pauta de medicación. Esta nueva modalidad terapéutica se halla en fase de desarrollo clínico. Se ha demostrado en humanos la ausencia de toxicidad y el poder inmunogénico (fase I); las fases posteriores (II y III), que demuestran la eficacia del tratamiento, requerirán un mínimo de cinco años.

Pere-Joan Cardona
Instituto Germans Trias i Pujol
Unidad de Tuberculosis Experimental
CIBER Enfermedades Respiratorias
Universidad Autónoma de Barcelona, Badalona

EN LAS TRINCHERAS

Para combatir la tuberculosis resulta imprescindible el desarrollo de nuevos fármacos. Pero las autoridades sanitarias no pueden esperar a que estén disponibles. De ahí la existencia de programas como "Stop a la tuberculosis", de la Organización Mundial de la Salud, que trabajan para detener la pandemia mediante el aumento de los controles de calidad de los dispositivos diagnósticos, el refuerzo de la supervisión y ayuda a los pacientes, el suministro de los fármacos y la educación de la población en atención sanitaria. El programa tiene como objetivo reducir la cifra de muertes por tuberculosis a más de la mitad en 2015.

ESTRATEGIAS TERAPEUTICAS PROMETEDORAS

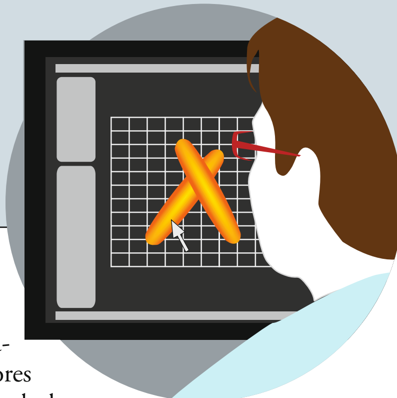
Los fármacos antituberculosos de primera línea actuales se desarrollaron en los años cincuenta y sesenta del siglo pasado. Necesitan administrarse de seis a nueve meses; el abandono precoz del tratamiento causa la aparición de formas resistentes de tuberculosis. Urge el desarrollo de fármacos sencillos de tomar, más baratos y que neutralicen el *Mtb* por otras vías.

HOY:
El método tradicional de ensayo y error utilizado para descubrir fármacos antituberculosos ha dado lugar a algunos candidatos que se hallan en fase de ensayo clínico.

FARMACO/TIPO DE FARMACO	COMO ACTUA CONTRA LA TUBERCULOSIS	FASE DE DESARROLLO
Fluoroquinolonas (ya aprobadas para el tratamiento de otras alteraciones)	Inhibe la replicación del ADN	Fase de ensayo clínico III (las pruebas más amplias de eficacia)
Nitroimidazoles (PA-824/OPC67683)	Inhibe la síntesis de la pared celular y la respiración celular	Fase II (eficacia)
Diarilquinolina (TMC207)	Inhibe la síntesis de ATP, la molécula de almacenamiento de energía	Fase II
Oxazolidinonas	Inhibe la síntesis de proteínas	Fase II
SQ109	Inhibe la síntesis de la pared celular	Fase I (seguridad)

FUTURO:
Los expertos han empezado a escudriñar el Mtb mediante el estudio del genoma y de otros componentes celulares. Este trabajo ha arrojado luz sobre el mecanismo de infección en los humanos y sobre los puntos débiles de la bacteria. Los investigadores deberían poder inhibir la síntesis de ATP con mayor eficacia que los fármacos actuales. Cabe presumir que se descubran compuestos que estimulen en la bacteria la liberación de mayor cantidad de óxido nítrico, que impide la respiración celular. El bloqueo de la síntesis de niacina, el principal transportador celular de energía, constituye otra de las estrategias potenciales.

FUTURO LEJANO:
Los investigadores quieren crear un modelo in silico del Mtb, un modelo virtual que opere exactamente igual que su homólogo en humanos. Este modelo permitirá prever con mayor precisión la respuesta del organismo ante los componentes bacterianos.



vacuna contiene una cepa de *Mtb* que ha perdido su virulencia, pero conserva la capacidad de inducir en el sistema inmunitario del niño una reacción contra la bacteria tuberculosa. Por desgracia, la prueba diagnóstica más utilizada no distingue entre la respuesta inmunitaria provocada por un *Mtb* virulento y la respuesta a una forma vacunal: los resultados son idénticos en una persona infectada y en una que ha sido vacunada.

Mientras se secuenciaba el genoma del *Mtb*, científicos de Seattle descubrieron que la cepa bacteriana utilizada en la vacuna había perdido un extenso fragmento de ADN. Poco después, de forma independiente, otros grupos, del Instituto Pasteur, de la facultad de medicina Albert Einstein de la Universidad Yeshiva en Nueva York y de la Universidad de Washington, demostraron que los genes perdidos resultaban esenciales para la virulencia. La región suprimida en la cepa vacunal abría una vía para mejorar la especificidad de la prueba diagnóstica.

Una prueba que detectara sólo una respuesta inmunitaria frente a los factores virulentos ausentes de la cepa vacunal debería diferenciar entre individuos infectados y vacunados. En 2005 se fabricó un test diagnóstico de ese tipo, que fue aprobado por la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) estadounidense. Varios estudios recientes han demostrado su seguridad. Por desgracia, su coste es muy elevado, lo que limita su administración a los países ricos.

El genoma del *Mtb* no es la única fuente de información sobre los puntos débiles de la bacteria tuberculosa. Hoy en día se estudian toda clase de componentes y procesos celulares: desde las proteínas (proteómica) hasta los productos intermedios y finales del metabolismo celular (metabolómica), pasando por la cantidad de ARN mensajero (las plantillas desde

MELISSA THOMAS (*ilustraciones*)

Los autores

Clifton E. Barry III dirige la sección de investigación sobre tuberculosis del Instituto Nacional de la Salud en el Instituto de Alergia y Enfermedades Infecciosas (NIAID). Centra su trabajo en el desarrollo de fármacos antituberculosos y en la genómica aplicada a los mismos. Lleva a cabo un programa de ensayos clínicos en Corea del Sur con enfermos de tuberculosis altamente resistente a los fármacos. **Maija S. Cheung** es becaria del NIAID. Se graduó en el Colegio Middlebury.

donde se sintetizan las proteínas) procedente de cada gen (transcriptómica).

Todos esos campos de investigación, aunque en sus preliminares, han dado ya algún fruto. En noviembre de 2008, Barry fue el coautor de un artículo publicado en *Science* en el que se daba a conocer que, cuando la tuberculosis se trata con PA-824, el transcriptoma bacteriano reacciona igual que si se hubiera envenenado con cianuro potásico. El hallazgo reviste sumo interés, pues, al metabolizar el medicamento, el *Mtb* libera óxido nítrico, una molécula defensiva que suelen producir las células inmunitarias. A partir de esa información, nosotros y otros investigadores iniciamos la síntesis de compuestos que estimulan la liberación de cantidades de óxido nítrico mayores que las obtenidas por el PA-824 y que serán, por tanto, más potentes frente al *Mtb.*

Y a modo de complemento de tales enfoques, la genómica estructural busca descubrir la estructura tridimensional de cada proteína del *Mtb*, tarea que puede ayudar a identificar las funciones aún desconocidas de muchas de las proteínas de la bacteria, así como a diseñar y sintetizar fármacos dirigidos a zonas concretas de proteínas críticas. Esta línea de investigación es tan prometedora, que un consorcio internacional, con miembros pertenecientes a 17 países, concentra sus esfuerzos en desentrañar la genómica estructural del *Mtb*. Hasta la fecha, el consorcio ha colaborado en la determinación del diez por ciento de las proteínas de la bacteria.

Otra “ómica” reseñable es la genómica química, un nuevo campo de investigación que invierte el proceso estándar llevado a cabo hasta ahora en el desarrollo de fármacos. En lugar de comenzar con una proteína de función conocida y buscar un compuesto que inhiba su actividad, se parte de un compuesto conocido que posea una propiedad deseable; por ejemplo, la capacidad de inhibir la reproducción del *Mtb* en cultivos celulares. A continuación se identifica la enzima microbiana inhibida por dicha sustancia. Los compuestos pueden tener un origen artificial (moléculas sintetizadas en el laboratorio) o natural (productos aislados de plantas, microorganismos o animales). El compuesto inicial sirve estrictamente para revelar las enzimas o procesos biológicos vulnerables que podrían convertirse en dianas farmacológicas.

El interés de tal procedimiento radica en que nos permite aprovechar el poder de la selección natural para eliminar el *Mtb.* Antes que el *Mtb* y otras micobacterias convirtieran al hombre en su huésped, ocuparon nichos ecológicos en donde debían competir, en una lucha constante por los recursos, con otras bacterias.

RESISTENCIA MUNDIAL

La tuberculosis se halla presente por doquier, aunque más arraigada en países en vías de desarrollo. La incidencia de tuberculosis causada por cepas de *Mtb* resistentes a dos o más de los antituberculostáticos de primera línea, o tuberculosis multifarmacorresistente (TB-MFR), ha aumentado debido a una administración deficiente de los antibióticos. Peor aún es la tuberculosis extremadamente resistente a los fármacos (TB-XRF), una forma que resulta intratable, identificada en 2006; hasta junio de 2008, 49 países habían confirmado algún caso de esta variedad. Por desgracia, la cifra mencionada muestra una prevalencia probablemente subestimada de TB-XRF.

TB



TB multirresistente



TB extremadamente resistente



MELISSA THOMAS (*ilustraciones*); FUENTE: CLIFTON E. BARRY III Y OMS

Los ecosistemas bacterianos experimentaron múltiples cambios debido a la selección natural; la mayoría de las bacterias desarrollaron estrategias para frenar a las micobacterias. Prueba de ello es la gran variedad de formas bacterianas que hallamos en esos ecosistemas. Si pudiera explorarse el increíble reservorio armamentístico que estas bacterias competidoras han desarrollado —mediante herramientas "ómicas" modernas que identificaran las moléculas defensivas, determinaran su potencial antituberculoso y precisaran sus dianas moleculares en el *Mtb*— descubriríamos, sin duda, nuevos fármacos. Podríamos entonces seleccionar los agentes que bloquean el sistema entero del microorganismo patógeno y no un proceso aislado, para el cual el *Mtb* probablemente tendría una alternativa.

Microbiología computacional

Para recoger todos los beneficios de la revolución "ómica", necesitamos herramientas de gestión de la información que nos permitan dar sentido a la ingente cantidad de datos generados por los experimentos "ómicos". El desarrollo de tales herramientas ha dado lugar a una nueva disciplina: la bioinformática. Sólo con dichas herramientas podremos esclarecer otro obstáculo surgido en el desarrollo de fármacos: las propiedades emergentes, comportamientos de los sistemas biológicos que no pueden predecirse a partir de las propiedades bioquímicas básicas de sus componentes.

La conciencia, por ejemplo, corresponde a una propiedad emergente de la bioquímica cerebral. En el *Mtb in vitro*, una propiedad emergente sería la tendencia de la bacteria a formar "cuerdas": estructuras serpentiformes que resultan de las complejas interacciones entre las moléculas de la superficie bacteriana y cuyo desarrollo no puede predecirse a partir de las propiedades de las moléculas implicadas. En un huésped humano, las interacciones entre tales moléculas de superficie y las células del sistema inmunitario producen un granuloma, un agregado de células del huésped y bacterias, muy difícil de penetrar por un medicamento. El granuloma corresponde, pues, a una propiedad emergente de la interacción entre el *Mtb* y su huésped.

Con la ayuda de la bioinformática, esperamos comprender el modo en que los cuatro mil genes del *Mtb*, las proteínas correspondientes y los productos resultantes del metabolismo bacteriano reaccionan cuando se trata *in vitro* el *Mtb* con un fármaco nuevo. En el curso de los últimos diez años hemos empezado a juntar las piezas que explican el comportamiento de la bacteria en el interior de los enfermos tuberculosos, más allá de su actividad *in vitro*. Se pretende, en última instancia, reproducir el *Mtb in silico*, es decir, desarrollar una simulación virtual de la bacteria que reproduzca el comportamiento de la misma en el interior del organismo hospedador. El entusiasmo generado por este logro no es exagerado, ya que permitirá predecir qué componentes bacterianos son las mejores dianas para los fármacos y qué fármaco potencial operará mejor sobre estas dianas.

Para lograr ese objetivo, los científicos deberán identificar, hasta el mínimo detalle, todas las vías bioquímicas del organismo, así como las propiedades emergentes resultantes de la ejecución de esas vías. Se trata de una tarea ingente: desconocemos aun la función primaria de un tercio de las proteínas del *Mtb*, por no mencionar sus vías asociadas o las propiedades emergentes a que dan lugar. A partir de los datos anteriores, se espera obtener en los próximos veinte años una bacteria *in silico* que opere exactamente igual que las que crecen *in vitro* o en humanos.

Prevenir la infección tuberculosa es, sin duda, mejor que tener que curarla. Con este propósito se han concentrado los esfuerzos en la obtención de una vacuna que confiera mayor protección que la BCG. Por una parte se ha intentado mejorar la vacuna existente; por otra, se buscan vacunas nuevas. El trabajo se encuentra todavía en fase de ensayo y error, pues no comprendemos las causas del fracaso de la vacuna actual, ni sabemos prever, sin ensayarla antes en humanos, si una candidata funcionará.

En otras enfermedades para las cuales se dispone de vacuna, quienes sobreviven a una primera infección quedan inmunizados frente a infecciones futuras. En la tuberculosis, en cambio, la primera infección no proporciona protección alguna. Una vacuna que se basara sólo en una forma atenuada de la tuberculosis fracasaría. Mientras que el desarrollo de fármacos se vería beneficiado por la obtención de una bacteria *in silico*, para acelerar el desarrollo de la vacuna se necesitarían dos modelos *in silico*: uno de la bacteria y otro del organismo humano; ello facilitaría el estudio de los efectos en humanos de la alteración de las bacterias.

En *El punto de inflexión*, Malcolm Gladwell define dicho punto como "el nivel en el cual el impulso del cambio se hace imparable". Nunca hasta ahora ha sido tan apremiante la necesidad de disponer de pruebas diagnósticas, fármacos y vacunas antituberculosas. Queda mucho camino por recorrer, pero con la descodificación del genoma de *Homo sapiens* y *Mycobacterium tuberculosis*, y la dedicación de una falange de expertos, el impulso del cambio es imparable.

Bibliografía complementaria

LA MONTAÑA MAGICA. Thomas Mann. Traducción de Mario Verdaguer (4ª ed.). Plaza & Janés Editores, S.A., 1989.

THE FORGOTTEN PLAGUE: HOW THE BATTLE AGAINST TUBERCULOSIS WAS WON AND LOST. Frank Ryan. Little, Brown, 1993.

BUILDING A BETTER TUBERCULOSIS VACCINE. Douglas B. Young en *Nature Medicine*, vol. 9, n.º 5, págs. 503-504; 2003.

MULTIDRUG RESISTANT TUBERCULOSIS IN RUSSIA. Merrill Goozner en Scientific American.com; 28 de agosto, 2008.

PA-824 KILLS NONREPLICATING *MYCOBACTERIUM TUBERCULOSIS* BY INTRACELLULAR NO RELEASE. Ramandeep Singh et al. en *Science*, vol. 322, págs. 1392-1395; 28 de noviembre, 2008.

Técnicas de copiado y reproducción

Mediante moldes de caucho de silicona se obtienen copias idénticas al original

Marc Boada Ferrer

En numerosas ocasiones he comprobado que cuando los visitantes de un museo se enteran de que la pieza que observan es una réplica o un molde, experimentan una decepción. Por interesante o exacta que sea, no constituye la realidad genuina. Al científico, en cambio, le tranquiliza saber que se trata de una reproducción fidedigna.

Por moldeo pueden obtenerse todo tipo de formas. Y en cuantía abundante, lo que facilita la construcción de mecanismos integrados por componentes iguales. Uno de los campos que más se beneficia de las técnicas de copiado es la paleontología. En esta colaboración nos ocuparemos de ejemplificar las técnicas que acompañan al objeto original, desde la extracción del fósil de su matriz hasta la reproducción del espécimen. Usaremos materiales de fácil localización, que no siempre coincidirán con los que se utilizan en un laboratorio de paleontología.

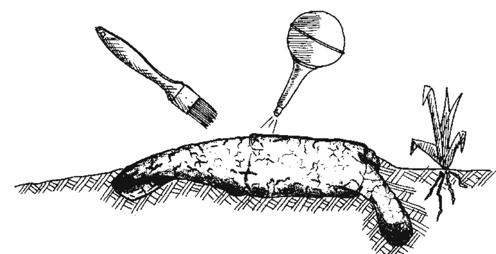
La labor no suele ser sencilla. La mandíbula de la foto apareció en un estado de fragmentación tal, que impedía su extracción de la roca. En ese caso, y en otros similares, se prepara in situ un recubrimiento rígido (cama rígida o momia) que permite levantar el bloque entero. Luego, en el laboratorio, se separa el fósil de la matriz y se limpia éste cuidadosamente. A la limpieza le sigue un proceso de consolidación: se impregna el fósil con una resina (pegamento nitrocelulósico) soluble en acetona y, por tanto, reversible, es decir, que puede eliminarse sin dejar rastro. Una vez endurecida y consolidada la pieza, puede emprenderse el copiado. La precisión de este proceso resulta fundamental, ya que permitirá disponer de reproducciones para ser enviadas a varios centros de estudio.

El molde más sencillo es el univalvo o molde barca. Se aplica cuando interesa reproducir sólo una cara del objeto (bajorrelieves, ignitas, improntas de hojas o esqueletos en conexión, por ejem-

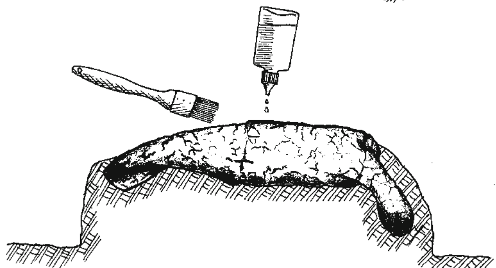


Mandíbula derecha del dinosaurio *Koutalisaurus Kohlerorum*: réplica del holotipo de la especie (*a*), fósil auténtico de un ejemplar infantil (*b*) y réplica del mismo (*c*), obtenida mediante un molde (bivalvo) de elastómero de silicona (*1* y *2*) y el posterior acabado (*3-5*).

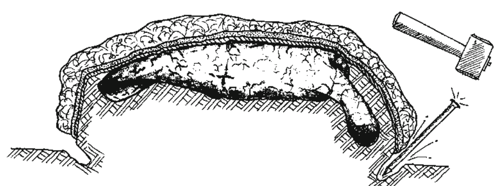
EXTRACCION Y CONSOLIDACION PARA EL TRANSPORTE



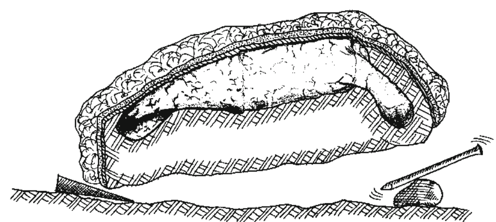
1. Localización y limpieza superficial



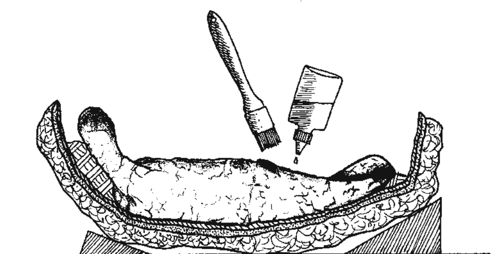
2. Consolidación con una resina reversible y excavación perimetral



3. Aplicación de papel de aluminio, laminado de fibra de vidrio y resina de poliéster, y espuma de poliuretano. Excavación de la base



4. Rotura del bloque



5. Limpieza y consolidación en el laboratorio

plo). Ahora bien, si se trata de reproducirlo tridimensionalmente, recurriremos a un molde bivalvo. La línea de unión entre las dos valvas corresponde a la línea de corte. Las particiones de un molde varían en función de la capacidad de desmoldeo de cada de una de las partes y, por tanto, de la forma de la pieza. Debe ejecutarse en el sitio más favorable para el desmoldeo: en una esfera se trazaría en el ecuador; en una vértebra pueden llegarse a realizar hasta más de seis particiones.

Para reproducir esta hemimandíbula juvenil de dinosaurio, de la cual había desaparecido la dentición, opté por seguir una línea de corte que pasaba por la arista mejor marcada. El primer paso consistió en enterrar (incluir) el fósil en plastilina hasta la línea de corte: la cara más lisa orientada hacia el exterior y ligeramente inclinado para facilitar la salida de aire en el momento de volcar la resina.

La plastilina, o mástic, debe cubrir una superficie que no siempre es plana. Formará con el fósil un ángulo perpendicular, evitando la aparición de meniscos. Con la superficie del mástic alisada, prepararemos una caja de metacrilato, cuyas dimensiones interiores sean 20 o 30 milímetros mayores que el fósil y

RESINAS Y POLIMEROS

Las técnicas de moldeado, que antaño recurrían a los moldes de yeso y a la galvanoplastia, han experimentado una mejora notable en los últimos decenios. En la actualidad, los plásticos permiten reproducir texturas finísimas; por ejemplo, una huella digital. Presentamos algunos de los principales productos utilizados en el copiado y la reproducción, que deben manejarse tomando las precauciones necesarias: sobre todo, buena ventilación y protección de ojos, cara y manos.

Silicona: Extensa familia de cauchos sintéticos. Se suministran en forma de fluidos viscosos que endurecen (polimerizan) mediante la adición de un catalizador. Su dureza puede escogerse entre 10 y 50 grados en la escala Shore A. Corresponde al material de primera elección para la obtención de moldes.

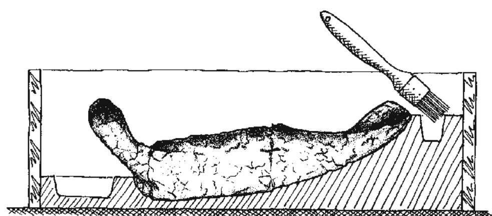
Mástic o plastilina: Masa plástica de uso imprescindible. Puede esculpirse para realizar esculturas científicas, en ocasiones de gran tamaño (un elefante o un mamut), que luego se copian en resina.

Resinas de poliéster: Son las más económicas. Polimerizan mediante un catalizador organometálico. Dada su fragilidad, se refuerzan con fibra de vidrio; óptimas para reproducciones huecas.

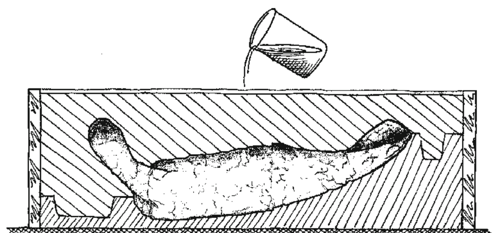
Resinas de poliuretano: Se obtienen de la mezcla a partes iguales de poliol e isocianato. Catalizan y endurecen en minutos. Su color marfil facilita el pintado y la reproducción. Ofrecen una resistencia notable al choque. Son termoplásticas y pueden deformarse en caliente.

Resinas epoxídicas: Catalizan en tiempos muy variables. Destacan por sus excelentes propiedades mecánicas, que mejoran con el embebido de fibras de carbono o kevlar. Su uso óptimo se encuentra en la ingeniería, donde superan a los metales en ciertas prestaciones.

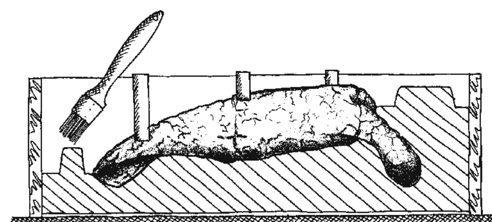
REALIZACION DEL MOLDE



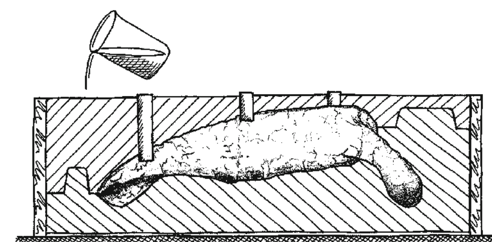
1. Base de plastilina y aplicación de vaselina filante



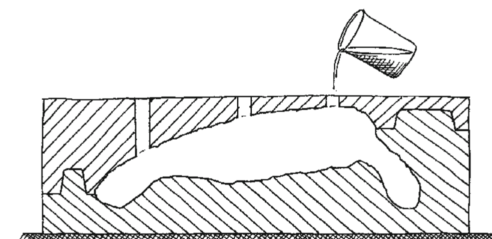
2. Primer volcado del caucho de silicona



3. Extracción de la plastilina, fijación de los vástagos para las coladas y aplicación de vaselina sobre la silicona



4. Segundo volcado del caucho de silicona



5. Volcado de la resina tras la extracción del original

cuya altura lo supere en 10 milímetros. Marcaremos el bloque de plastilina, cortaremos el sobrante y lo encajaremos en el interior de la caja de metacrilato.

Procederemos luego a imprimir sobre la plastilina unas incisiones de 3 o 4 milímetros de profundidad, troncocónicas, que garantizarán la coincidencia perfecta entre las dos valvas. Para asegurar un sellado perfecto, repasaremos la unión entre metacrilato y plastilina. Por fin, recubriremos esta última con una capa generosa de vaselina filante, a fin de impedir que el azufre que contiene la plastilina entre en contacto con la silicona e inhiba la polimerización de ésta. Luego, nivelaremos el molde y prepararemos el caucho de silicona. Calcularemos antes el volumen que queremos rellenar.

Prepararemos la silicona en un recipiente cuyo volumen sea un 50 por ciento superior al del molde. Las paredes del recipiente deberán ser lisas, para evitar adherencias del producto, sin entrar en contacto con el catalizador. Dosificaremos el catalizador y lo mezclaremos con una espátula larga, que llegue al fondo. La mezcla debe hacerse con lentitud, procurando introducir el mínimo aire posible; rascaremos las paredes para garantizar un resultado homogéneo.

A continuación, verteremos la silicona en el molde; lo haremos poco a poco, en chorro fino, donde se romperán algunas burbujas de aire. Procuraremos que el nivel suba de forma gradual, mojando todo el original, hasta llegar a la parte superior de la caja de metacrilato. Una vez esté llena la caja, esperaremos a que se endurezca el caucho de silicona (unas 24 horas). Procederemos luego a invertir el molde para extraer la plastilina. Esta operación resulta más fácil si antes se templa el molde delante de la estufa; debe hacerse con precaución, para no dañar el original. Limpiaremos luego en seco y con un hisopo el fósil y la silicona ya endurecida (vulcanizada). Extenderemos a continuación otra capa generosa de vaselina, para impedir que se pegue la valva superior del molde.

Antes de proceder al último volcado, pegaremos sobre el fósil unos cilindros, que dejarán sendos agujeros en la silicona, por los que inyectaremos más tarde la resina para el vaciado y por donde escapará el aire del interior del molde. Se fijarán los cilindros con una gota de adhesivo reversible en los puntos más elevados del objeto. Hecho esto, volcaremos la segunda ración de silicona. Esperaremos 24 horas más.

Transcurrido ese tiempo, extraeremos de la caja de metacrilato una valva del molde; luego, con extrema precaución, el original y, por fin, la otra valva. Limpiaremos perfectamente ambas, las cerraremos presionando con unas bandas de goma elástica y procederemos a llenar el molde con la resina adecuada (poliuretano, por ejemplo). La silicona tiene la ventaja de que nada se pega en ella, por lo que la pieza de poliuretano se extrae con facilidad.

La primera copia puede salir algo sucia, con restos de mástic adheridos. Pero si se ha realizado el molde correctamente, ello no suele ocurrir. La primera copia es entonces la mejor, la copia maestra; sobre ella se realizarán futuros moldes, para evitar volver a someter al original a este proceso. Las otras copias las limpiaremos con disolvente; eliminaremos con un bisturí la marca producida por la línea de corte o por las coladas, hasta dejarla con la misma textura que el fósil.

Mediremos con exactitud el original y la copia, para calcular el encogimiento. Pintaremos la copia con pintura acrílica, para que tome un aspecto idéntico al de un fósil de 65 millones de años. Obtendremos así una fiel reproducción del original que permitirá llevar a cabo un cómodo estudio científico manteniendo el fósil a salvo de percances.

Cómo salvar el mundo con una lámpara de sobremesa

¿Bastaría con una serie infinita de propósitos para lograr cualquier resultado?

Gabriel Uzquiano

Quisiera discutir el siguiente problema:

Hay una lámpara de sobremesa de las que poseen un interruptor en su base. La lámpara puede encontrarse en uno de los siguientes estados: encendida o apagada. Ante nosotros hay un agente que no sólo puede hacer un número infinito de propósitos en un período finito de tiempo, sino incluso ser completamente consecuente con todos y cada uno de ellos. A la 1 de la tarde, nuestro agente ya se ha propuesto lo siguiente:

(P_1) Si a las 2 encuentro que la lámpara está apagada, la encenderé inmediatamente.
(P_2) Si a la 1:30 encuentro que la lámpara está apagada, la encenderé inmediatamente.
(P_3) Si a la 1:15 encuentro que la lámpara está apagada, la encenderé inmediatamente.
Etcétera.

Estos instantes forman una secuencia infinita descendente: 2, 1:30, 1:15, 1:07, etcétera, cuyo límite —que no forma parte de la serie— es la 1 en punto. Nuestro problema consiste en averiguar el estado de la lámpara a la 1.

Parecería que no deberíamos ser capaces de deducir mucho acerca del estado de la lámpara a la 1 en punto. Al fin y al cabo, nada de lo que ha decidido nuestro agente le compromete a intervenir sobre el estado de la lámpara a la 1 en punto. Tampoco disponemos de mucha información acerca de su estado antes de la 1. Todo parece apuntar a la conclusión de que lo único que podemos saber acerca del estado de la lámpara a la 1 en punto es que se encuentra, o bien encendida, o bien apagada. Sin embargo, sorprendentemente, podemos deducir el estado de la lámpara a la 1.

Sin desvelar nuestra solución todavía, merece la pena comparar nuestro problema con uno similar pero mucho más discutido. Recordemos una de las paradojas de Zenón de Elea. Para desplazarnos de un punto A a un punto B debemos completar un número infinito de tareas. Llamemos A_1 al punto intermedio entre A y B. Para completar el desplazamiento entre A y B, deberíamos completar antes el desplazamiento entre A y A_1. Llamemos A_2 al punto intermedio entre A y A_1. Para completar la tarea anterior deberíamos completar antes el desplazamiento entre A y A_2, etcétera. Aunque la conclusión que se atribuye a Zenón es que cualquier desplazamiento es imposible, ya vimos en noviembre de 2008, cómo eludir varias de las rutas habituales que conducen a la misma.

Una ruta que no exploramos consistía, sin embargo, en argumentar que la idea misma de completar un número infinito de tareas —o una supertarea, como ha venido a llamarse— en un período finito de tiempo es incoherente. Eso mismo es lo que se propuso James Thomson en 1954 cuando invitaba a sus lectores a considerar un caso similar al nuestro. Thomson invitaba a considerar el resultado de intervenir un número infinito de veces sobre el estado de una lámpara de sobremesa como la que describimos en nuestro problema. En su caso, el agente debía encender y apagar la lámpara en intervalos de tiempo cada vez menores. Fijemos las 12 del mediodía como el primer instante de la secuencia de varias acciones sobre la lámpara y supongamos que la lámpara se encuentra apagada entonces.

(T_1) A las 12, encendemos la lámpara.
(T_2) A las 12:30, la volvemos a apagar.
(T_3) A las 12:45, la volvemos a encender.
Etcétera.

En resumen, la lámpara permanece encendida la primera media hora, apagada el siguiente cuarto de hora, encendida el siguiente octavo de hora, apagada el siguiente dieciseisavo de hora, etc. Cada uno de los cambios de estado tiene lugar en un instante de tiempo de la secuencia infinita ascendente: 12, 12:30, 12:45, etc., cuyo límite —que no forma parte de la serie— es, de nuevo, la 1 en punto.

Thomson, como nosotros, se preguntaba por el estado de la lámpara a la 1 en punto. Ahora bien, argumentaba, la lámpara no puede estar encendida a la 1 en punto ya que nunca la encendimos sin dejar de apagarla inmediatamente después. Pero, continuaba su razonamiento, tampoco puede estar apagada a la 1 en punto, ya que nunca la apagamos sin dejar de encenderla inmediatamente después. La conclusión de Thomson era un tanto descorazonadora. Como, por un lado, no podemos atribuir ningún estado a la lámpara a la 1 y, por otro, sabemos que la lámpara debe encontrarse en exactamente uno de los dos estados, debemos concluir que no es posible realizar un número infinito de tareas en un período finito de tiempo. Las paradojas de Zenón amenazaban con volver para vengarse.

No debemos preocuparnos. Aunque la descripción de la lámpara de Thomson determina que deba encontrarse en uno de dos estados a la 1, no hay nada en el caso que nos permita deducir cuál deba ser su estado en ese momento. Thomson cometía un error cuando argumentaba que la lámpara no podía estar en ninguno de los dos estados a la 1 en punto.

¿No debería ocurrir lo mismo en nuestro caso? Nosotros también nos estamos preguntando por el estado de la lámpara en un momento que figura como el límite de una serie infinita de momentos separados por intervalos de tiempo cada vez menores. En el caso de Thomson, concluimos que la información acerca de lo que ocurre en cada uno de esos instantes no determina el estado de la lámpara a la 1, de manera que es natural pensar que los hechos de nuestro caso tampoco determinan un estado concreto a la 1 en punto. Hay, sin embargo, dos diferencias cruciales. Una tiene que ver con la dirección de la serie: 2, 1:30, 1:15, etc., en lugar de 12, 12:30, 12:45, etc. La otra diferencia tiene que ver con lo que ocurre en cada uno de los momentos que figuran






en la serie. Mientras que en el caso de Thomson movemos el interruptor en cada uno de ellos, en nuestro caso sólo se interviene sobre el estado de la lámpara si ésta sigue apagada en cada momento de la secuencia.

¿Cuál es entonces el estado de la lámpara a la 1 en punto? Siempre que nos enfrentemos a un agente completamente consecuente con todos y cada uno de sus propósitos, podremos deducir que la lámpara debe estar encendida a la 1. Si lo está, nuestro agente no tendrá que intervenir para ser consecuente con todos y cada uno de sus propósitos. Al estar encendida a la 1, si nadie interviene sobre el estado de la lámpara, nunca se verá en la obligación de encenderla entre la 1 y las 2.

¿Qué ocurre si la lámpara se encuentra apagada a la 1? Se sigue del caso que nuestro agente se ha comprometido a lo siguiente:

(Z_1) Encenderé la lámpara a las 2 si y sólo si la lámpara continúa apagada entonces.
(Z_2) Encenderé la lámpara a la 1:30 si y sólo si la lámpara continúa apagada entonces.
(Z_3) Encenderé la lámpara a la 1:15 si y sólo si la lámpara continúa apagada entonces.
Etcétera.

Pero dados todos y cada uno de los propósitos P_n, se encontrará con lo siguiente:

(Y_1) Encenderé la lámpara a las 2, si y sólo si no lo he hecho antes.
(Y_2) Encenderé la lámpara a la 1:30, si y sólo si no lo he hecho antes.
(Y_3) Encenderé la lámpara a la 1:15, si y sólo si no lo he hecho antes.
Etcétera.

¿Quiere saber más?

Jon Pérez Laraudogoitia discute la posibilidad de las supertareas en "Supertasks" para la Stanford Encyclopedia of Philosophy: http://plato.stanford.edu/entries/spacetime-supertasks/

John Hawthorne ha argumentado que casos como el anterior involucran una conexión causal en "Before-Effect and Zeno Causality", *Noûs*, vol. 34, n.º 4, págs. 622-633; 2000.

Pero no todos estos enunciados pueden ser simultáneamente verdaderos. Si nunca enciende la lámpara entre la 1 y las 2, entonces todos los enunciados son falsos, ya que requieren que nuestro agente encienda la lámpara siempre que no lo haya hecho antes. Pero supongamos ahora que lo hace, digamos que a las 2. Se sigue de (Y_1) que no lo ha hecho antes, de modo que, dado (Y_2), nuestro agente debería haber encendido la lámpara a la 1:30 y no, por tanto, a las 2. No hay nada especial acerca de las 2. El mismo razonamiento se aplica a cualquier otro momento de la secuencia. Por tanto, nuestro agente no puede encender la lámpara en ningún instante de la secuencia.

Resumiendo, si la lámpara se encuentra apagada a la 1 de la tarde, se sigue de la descripción del caso que cada uno de los enunciados (Y_n) debe ser verdadero, lo cual es absurdo. Parece que debemos concluir que, dado un agente completamente sincero y consecuente con sus decisiones, la lámpara debe estar encendida a la 1 en punto. ¿Cómo interpretar este resultado? Una manera sería decir que hay razones estrictamente lógicas por las cuales no es posible formular todos y cada uno de los propósitos de la forma (P_n) y, simultáneamente, ser consecuente con todos y cada uno de ellos. Sin embargo, no parece haber barreras lógicas para la formación de tales propósitos en un mundo en el cual la lámpara se encuentra encendida a la 1. Una alternativa que algunos han encontrado atractiva consiste en mantener que, si un agente puede formar tales propósitos de manera consecuente, entonces el mismo agente es responsable del estado de la lámpara a la 1 en punto. Curiosamente, un agente tal es capaz de encender la lámpara por medio únicamente de sus propósitos de intervenir en los momentos adecuados.

Hay un problema. Si nuestro agente puede causar el encendido de la lámpara a la 1 en punto sin apenas acercarse a ella, entonces puede realizar hazañas mucho mayores. Veamos cómo salvar el mundo con una lámpara de sobremesa:

Hágase con una lámpara de sobremesa, preferiblemente una de las que poseen un interruptor en su base. Supongamos que la lámpara se encuentra apagada a la 1 en punto. Basta ahora con que forme cada uno de los siguientes propósitos antes de la 1 de la tarde:

(P_1) Si a las 2 encuentro que no hay paz en el mundo, encenderé la lámpara inmediatamente.
(P_2) Si a la 1:30 encuentro que no hay paz en el mundo, encenderé la lámpara inmediatamente.
(P_3) Si a la 1:15 encuentro que no hay paz en el mundo, encenderé la lámpara inmediatamente.
Etcétera.

Recuerde que debe permanecer fiel a estos propósitos, sean cuales sean las circunstancias. Si sigue las instrucciones al pie de la letra, entonces a la 1 en punto habrá logrado que haya paz en el mundo.

El razonamiento es exactamente idéntico al anterior. Si el mundo sigue como hasta ahora a la 1 en punto, entonces nos encontraremos con la verdad de Z_1, Z_2, Z_3, etcétera. Y dados los propósitos iniciales, nos encontramos de nuevo con Y_1, Y_2, Y_3, etcétera.

Pero sabemos que estos enunciados no pueden ser simultáneamente verdaderos. Se sigue que debe haber paz mundial a la 1 en punto, o que no vamos a ser consecuentes con todos y cada uno de nuestros propósitos. Un gran poder conlleva una gran responsabilidad. Parecería que un agente como el nuestro podría conseguir cualquier meta que se proponga por muy inocente o siniestra que ésta sea.

¿O no? Tal vez sea más razonable adoptar una perspectiva diferente. Que un agente sea capaz de formar los propósitos en cuestión depende en primer lugar de cuál sea el estado del mundo a la 1. Si no hay paz mundial a la 1, entonces será imposible que ningún agente forme los propósitos descritos anteriormente y, además, sea consecuente con ellos. No es que los propósitos causen el evento inicial, sino más bien al contrario. El evento en cuestión hace posible que el agente forme los propósitos descritos en primer lugar.

Teléfonos inteligentes

Las pantallas táctiles redefinen el mercado

Mark Fischetti

En 2007, en cuanto Apple lanzó el iPhone, su gran pantalla táctil hizo que tuviera un éxito instantáneo. En EE.UU., el aparato funcionaba exclusivamente en la red inalámbrica de AT&T (en España, la operadora es Movistar); otros proveedores de circuitos suplicaron a sus fabricantes de teléfonos que idearan competidores sin tardanza. La rebatiña estaba servida y durante las vacaciones de verano de 2008 florecieron las alternativas a la pantalla táctil. Súbitamente vimos salir al mercado el Blackberry Storm, de Research in Motion, que opera con la red de Verizon (la operadora española es Vodafone), el Dream G-1 (T-Mobile, Movistar) de HTC, varios modelos de Samsung (Sprint, Vodafone), Nokia N96 (Movistar) y otros.

Cada uno de estos aparatos puede calificarse de teléfono inteligente, que viene a indicar que la técnica es suficientemente robusta para brindar un conjunto de servicios superior a los de comunicación de voz y texto de los teléfonos corrientes, y también, muchas veces, que el sistema operativo está abierto a terceros, a creadores de programas que pretendan introducir funciones novedosas. Los teléfonos móviles están haciendo cada vez más uso de las redes celulares 3G, que facilitan una navegación más rápida en la Red y una recepción y envío de correo electrónico también más rápidos. Pero el auténtico atractivo para los consumidores reside en la pantalla táctil. “Cada proveedor dispone ahora de un teléfono insignia cuya promoción impulsa con todos sus medios, tratando de competir con el iPhone”, dice Ross Rubin, director de análisis industriales de NPD Group, empresa de investigación de mercados.

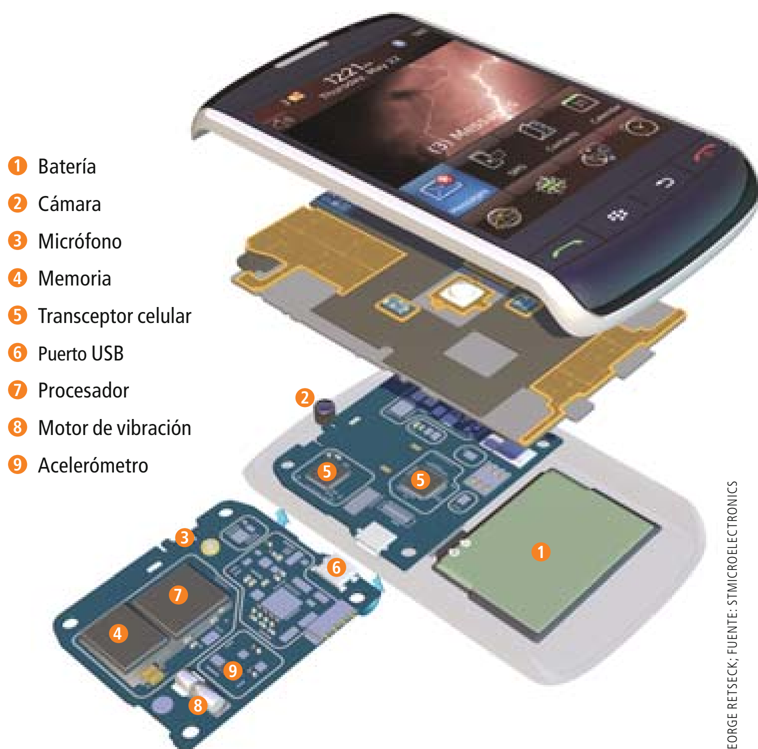
Estos teléfonos rebosan de sistemas: fotografía digital, videocámaras, reproductores de música y pantallas seductoras (*véanse las ilustraciones*). Acaso no tarden en evolucionar hacia ordenadores del tamaño de un libro. Hewlett-Packard y otros están vendiendo ya *netbooks* o miniportátiles con capacidades 3G de Internet; la llegada del servicio de telefonía móvil se espera en breve.

Los teléfonos inteligentes reúnen un increíble conjunto de funciones de telecomunicación: correo electrónico, navegadores de la Red, navegadores de GPS y, sí, también el genuino teléfono móvil. Y vendrán más cosas. Finalmente, la promesa de poner en servicio un ancho de banda para portátiles —equivalente al servicio ADSL— requerirá evolucionar a 4G, ya en fase de diseño bajo las siglas de LTE (AT&T y Verizon) y WiMax (Sprint).

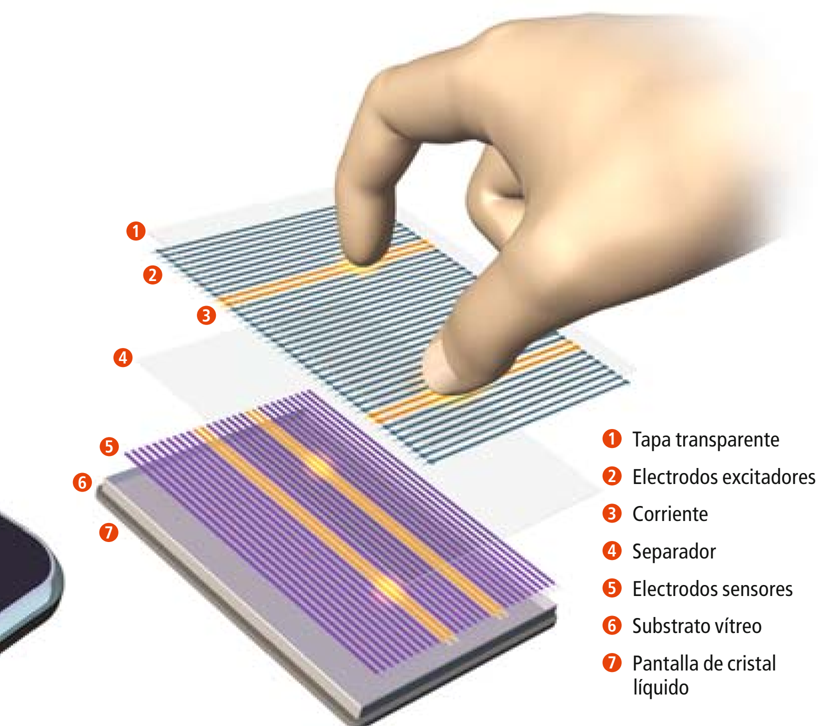
Cuando salga la 4G, los proveedores del servicio podrían finalmente abrir sus redes inalámbricas, de modo que los consumidores puedan comprar teléfonos de distintos fabricantes capaces de funcionar en varias redes. Esos teléfonos serán probablemente más caros, porque los proveedores no los subsidiarán para ligar a los consumidores a un contrato de dos años. “Pagaríamos sólo el servicio del mes, e incluso el de cada día”, predice Rubin, “sin penalizaciones por cambiar de compañía.”



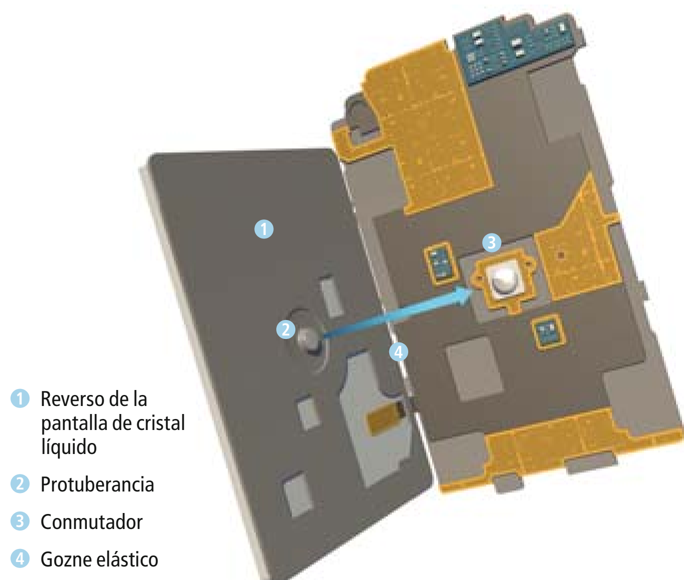
1. LOS TELEFONOS INTELIGENTES, tales como el Apple iPhone (*arriba*) y el Blackberry Storm (*abajo*), rebosan de funciones independientes y dispositivos de telecomunicación.



GEORGE RETSECK; FUENTE: STMICROELECTRONICS



2. LA PANTALLA del iPhone y del Storm es una pantalla táctil "de capacitancia mutua y líneas de campo proyectadas". Los electrodos excitadores transportan la corriente de la batería y forman un retículo con los electrodos sensores. Cuando un objeto conductor, por ejemplo la punta de un dedo, toca la pantalla, se altera la capacitancia mutua entre los electrodos sensores próximos; así se identifica el punto de contacto. La mayoría de las pantallas pueden responder a un toque cada vez, pero la pantalla multitoque del iPhone puede responder a dos dedos simultáneamente.

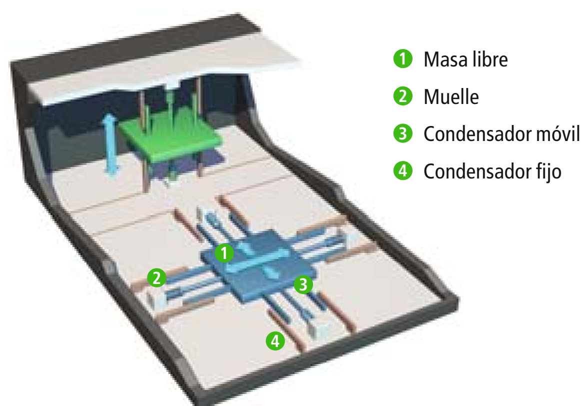


3. SENSACION DE CLIC: En el Storm, sobre los usuarios actúa una reacción táctil cuando oprimen una tecla virtual en la pantalla. Esta desciende levemente y una protuberancia en el reverso acciona un microinterruptor, que reacciona empujando hacia afuera.

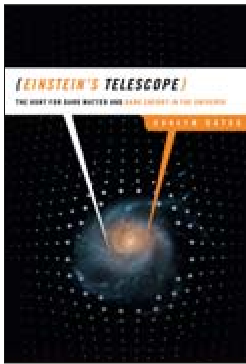
¿SABIA USTED QUE...?

➤ **SACUDIDAS:** En los teléfonos de pantalla táctil se han insertado acelerómetros para detectar cuándo la pantalla gira de la orientación "retrato" a la posición "paisaje". Pero la inclusión facilita, además, otras aplicaciones. Cuando el iPhone muestra una lista de restaurantes próximos, al sacudirlo se reordenan las entradas; el acelerómetro puede, asimismo, ordenar a la cámara que, por la noche, sólo tome fotos con poca luz si el teléfono se mantiene inmóvil.

➤ **MID:** Como las pantallas táctiles aumentan el tamaño de los teléfonos móviles en vez de reducirlo, los dispositivos móviles de Internet (MID, de "Mobile Internet Devices") están recibiendo un interés creciente. Los MID vienen a ser el doble de grandes que los teléfonos de pantalla táctil y están optimizados para una función, tal como una videocámara capaz de cargar sin cables sus datos en la Red o una consola móvil de videojuego que permite a gentes de todo el mundo jugar unas con otras. Intel está promocionando el concepto y el nombre MID, en parte porque fabrica un procesador, de nombre Atom, que puede servir para esos dispositivos, y ya se encuentra en ordenadores netbook de muy pequeño tamaño, optimizados para navegar en la Red.

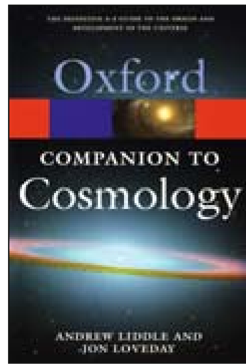


4. EL ACELEROMETRO percibe cuándo se gira el aparato desde la posición vertical hasta la horizontal, para que la programación del dispositivo pueda reorganizar los iconos y así ocupen toda la pantalla. En el diseño microelectromecánico triaxial de STMichroelectronics, cuando se mueve una masa libre (*azul*) unida a unos muelles, las placas del condensador solidarias con éstos se desplazan respecto de las placas fijas, informando de las componentes del movimiento en los planos *x* e *y*. Un segundo sensor (*verde*) del mismo chip rastrea el movimiento en la dirección *z*.



EINSTEIN'S TELESCOPE.
THE HUNT FOR DARK MATTER AND DARK ENERGY IN THE UNIVERSE,

por Evalyn Gates. W. W. Norton and Company; Nueva York, 2009.



THE OXFORD COMPANION TO COSMOLOGY,

por Andrew Liddle y Jon Loveday. Oxford University Press; Oxford, 2009.

Cosmología

Constitución ignota del universo

La ciencia ha dado pasos de gigante en el conocimiento de las realidades extremas del universo, en los dominios de lo mínimo y lo máximo. A escalas parvísimas del reino subatómico, el modelo estándar de física de partículas ha suministrado un marco sólido a los bloques constituyentes de la materia. En la otra punta del espectro, la relatividad general establece los fundamentos del modelo de la gran explosión inicial (*Einstein's Telescope. The Hunt for Dark Matter and Dark Energy in the Universe*). Desde el punto de vista experimental, existen dos formas principales de explorar el mundo de las partículas. El primer enfoque implica provocar la colisión entre dos fragmentos de materia a altísimas energías y observar qué surge del choque, aunque sea de vida efímera. De acuerdo con la ecuación de Einstein, $E = mc^2$, parte de la energía de la colisión puede convertirse en nuevas partículas. El segundo método consiste en establecer una trampa y esperar qué partículas se capturan o pasan a través de la misma, dejando tras de sí un rastro de pruebas.

La cosmología —el estudio del universo y su evolución— atraviesa un momento de particular excitación (*The Oxford Companion to Cosmology*). Aplicando las teorías de Einstein sobre el espacio y el tiempo, estamos realizando sorprendentes progresos en la aprehensión de la energía y de la materia obscuras que integran el grueso del cosmos. La materia obscura fría lambda constituye el modelo actual predominante. En dicho modelo, la energía obscura es el componente principal del universo. Habría un 5 % de materia normal, un 23 % de materia obscura, una nueva clase de materia que no puede observarse directamente y un 72 % de energía obscura, substancia desconocida que alimenta la expansión acelerada del universo.

El modelo estándar de la física de partículas describe las partículas fundamentales que constituyen la materia normal, la constituida por quarks y electrones, que dan cuenta de nuestro planeta y cuanto en él observamos. Nos ofrece una interpretación matemática del mundo subatómico —las partículas fundamentales que componen la materia normal y sus interacciones— que ha demostrado un éxito reseñable.

Para describir el universo macroscópico nos valemos de la teoría de la gran explosión (*Big Bang*), de éxito formidable también. Fue Fred Hoyle quien acuñó la expresión *Big Bang* en 1949, en un programa de radio de la BBC. Por su parte, este físico inglés defendía una teoría antagónica, la del universo de estado estacionario. Hay montañas de pruebas que respaldan el modelo de la gran explosión. El universo, expone, comenzó como un gas denso y caliente de energía que fue enfriándose en el curso de miles de millones de años de expansión del espacio, un proceso que sigue operativo hoy. Pese a su denominación, no fue ninguna explosión en el espacio, sino una singularidad que supuso el comienzo del espacio y del tiempo.

Hace unos 13.700 millones de años, la parte del universo que percibimos hoy, y probablemente mucho más, se encontraba confinada en una región muy densa y caliente, más pequeña que el punto de la i. La temperatura y la densidad se aproximaban al infinito. La temperatura superaba los 10^{32} grados. Un minuto después de la gran explosión, la temperatura había caído por debajo de los mil millones de grados; protones y neutrones se enlazaron para formar los elementos más ligeros del universo en un proceso de nucleosíntesis. Hidrógeno principalmente, con helio y litio, constituyeron las primeras masas de gas que ocuparon el universo, gas que en el decurso del tiempo formaría las primeras estrellas. El resto de los elementos surgirían en las estrellas y las galaxias.

Miles de años después de la gran explosión, el contenido en energía del universo se hallaba en forma de radiación: luz y partículas aceleradísimas. La materia (partículas de movimiento lento) constituía una pequeña fracción. Por fortuna para nuestra presencia, la razón de materia a radiación cambió con la expansión del cosmos; la materia aumentó hasta predominar frente a la radiación, que fue perdiendo gradualmente importancia. En un universo pleno de radiación, la expansión del espacio supera la atracción gravitatoria de materia hacia determinadas regiones superdensas; no se deja crecer a las semillas de futuras estrellas y galaxias. La materia debe constituir el componente dominante del cosmos antes de que empiecen a formarse las galaxias.

Cuando la temperatura cayó por debajo de los 3000 grados, unos 380.000 años después de la gran explosión, electrones y protones se unieron para formar átomos neutros. La luz se liberó. Conocida como fondo cósmico de microondas, esa luz es un destello de la explosión inicial que se ha convertido en una mina de información cosmológica. Cuando hoy detectamos esa luz, en realidad estamos contemplando una imagen de cómo era el universo unos 400.000 años después del origen de todo. La edad obscura terminó con la creación de las primeras estrellas. Ignoramos el instante preciso

en que se formó la primera estrella, que debió de ser unos cientos de millones de años después de la gran explosión.

Nuestro universo consta hoy de unos 100.000 millones de galaxias, cada una con cientos de miles de millones de estrellas. La temperatura ha caído casi a cero; el fondo cósmico de microondas, que opera como termómetro cósmico, brilló inicialmente a una temperatura de 3000 grados y ahora lo hace a 2,73 grados por encima del cero absoluto.

Para pergeñar la historia del cosmos que acabamos de resumir, los astrofísicos se fundan en tres componentes clave: la expansión del universo, la formación de los elementos ligeros y el fondo cósmico de microondas. En 1929, Edwin Hubble presentaba las primeras pruebas del mutuo alejamiento de las galaxias, manifestación de que vivimos en un universo en expansión. Por su parte, la nucleosíntesis nos faculta para establecer predicciones precisas sobre la concentración de los elementos ligeros en un cosmos precoz. Por último, el fondo cósmico de microondas, detectado en 1965, reveló una temperatura que resultaba coherente con las predicciones sobre un universo que empezó en un estado denso y caliente para ir luego expandiéndose y enfriándose.

Mas, a medida que hemos ido ahondando en la comprensión de la evolución del cosmos, las observaciones revelan con creciente vigor otro trío de puntos clave: existe mucha más materia en el universo que la concentrada en estrellas y galaxias; en cuantía predominante, esa materia oculta no puede estar constituida por partículas del modelo estándar; por último, la mayor parte del universo no consta de ningún tipo de materia.

En 1933, Fritz Zwicky firmó el primer trabajo en el que se hablaba del componente obscuro del cosmos. Puso su mirada sobre el cúmulo de Coma, que consta de más de mil galaxias que giran alrededor del interior del núcleo a velocidades increíbles, guiada su rotación por la atracción gravitatoria de la masa contenida en el cúmulo. Sabido es que la fuerza de la gravedad, la más débil de las cuatro fundamentales, constituye el principal motor y conformador del universo. Zwicky se centró en ocho de esas galaxias y descubrió que todas desarrollaban un movimiento mucho más rápido de lo previsto. Las galaxias tenían velocidades de hasta tres millones de kilómetros por hora, lo que entrañaba que el cúmulo contenía 50 veces más masa que la que correspondería a la suma total de todas las galaxias integrantes. En su artículo, escrito en alemán, Zwicky sugería la posibilidad de que sus observaciones implicaran la existencia de *dunkle Materie*, esto es, *materia obscura*. Tres años más tarde, Sinclair Smith halló un resultado semejante para el cúmulo de Virgo.

En 1970, Vera Rubin y Kent Ford estudiaban la galaxia de Andrómeda (conocida también por M31) y, mediante la medición de las velocidades a las que orbitan las nubes de gas, hallaron que también esa galaxia debía contener elevadas cantidades de materia obscura. Dichas velocidades requieren el tirón gravitatorio de muchísima más materia que la que puede contemplarse en la masa combinada de sus estrellas y polvo.

Hace unos 13 años, dos grupos independientes, uno dirigido por Saul Perlmutter, del Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley, y el otro encabezado por Brian Schmidt, del observatorio de Monte Stromlo y del observatorio Siding Spring, comenzaron a observar supernovas remotas. Descubrieron un fenómeno sorprendente. En principio, la mutua atracción gravitatoria debía poner freno al impulso centrípeto de las galaxias, pero en vez de ir amortiguando su paso, observaron que el universo lo estaba acelerando. Debía, pues, mediar la intervención de una energía desconocida, obscura, que alimentara la aceleración. La gravedad, considerada antaño el agente principal, está cediendo el control del cosmos a esa entidad exótica. El hallazgo mereció la distinción de "hito del año", correspondiente a 1998, por la revista *Science*. La expresión "energía obscura" fue acuñada por Michael Turner ese mismo año.

Podemos emplear lentes gravitatorias en la búsqueda de materia y de energía obscuras. Hemos comenzado a seguir la traza de materia obscura que rodea a las galaxias y domina la cuantía de masa del universo. Hemos empezado a ahondar en la estructura del universo en regiones donde puede encontrarse la luz. El fenómeno de las lentes gravitatorias constituye la única vía para cartografiar las hebras y filamentos de materia obscura que cruzan el universo. ¿En qué consiste la materia obscura? No está hecha de antimateria, cuyas partículas (antiprotones, por ejemplo) fueron aniquiladas por partículas de materia en una fase temprana de la historia del universo. ¿De qué consta, pues? Se han propuesto, entre otros candidatos, los agujeros negros, enanas marrones, cuerdas cósmicas, axiones, neutrinos, monopolos y varias partículas exóticas, como las partículas masivas débilmente interaccionantes.

Parte de la materia obscura es materia bariónica normal, que no ha sido incorporada dentro de las estrellas y, por tanto, no brilla con esplendor suficiente para poder ser percibida. Las observaciones concernientes a la concentración de elementos primordiales ("nucleosíntesis") y las anisotropías de la radiación cósmica de microondas suministran pruebas sólidas de que la densidad de materia bariónica existente en el mundo se acerca al 4 o 5 por ciento de la densidad crítica. Un cómputo directo de la materia visible nos da una respuesta mucho menor, en torno al 0,5 por ciento de la densidad crítica.

La materia obscura fría constituye la hipótesis estándar de los cosmólogos. Se distingue de otras formas de materia obscura en razón de sus partículas componentes, que tienen velocidad no relativista. Lo mismo que cualquier candidato a materia obscura, el papel de la materia obscura fría estriba en suministrar la atracción gravitatoria necesaria para explicar un extenso abanico de fenómenos astrofísicos y cosmológicos que hasta ahora han escapado a la detección directa; sus interacciones con la materia normal deben ser extremadamente débiles o inexistentes. Esto excluye la posibilidad de interacciones a través de las fuerzas fundamentales nuclear fuerte y electromagnética, en tanto que deja abierta la posibilidad de interacciones nucleares débiles. Se supone que está constituida por partículas elementales fundamentales, como las predichas por la supersimetría: entre ellas, las WIMP (acrónimo de "Weakly Interacting Massive Particles"), donde el término "débil" remite a la fuerza nuclear débil.

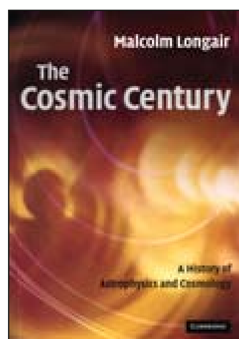
Por su parte, la materia obscura caliente designa la candidata a materia obscura cuya velocidad desempeña un papel significativo en la determinación de su ubicación. El candidato clásico a materia obscura caliente es el neutrino, un tipo de partícula elemental producido en la desintegración radiactiva y que se supone abundó en un universo incipiente. Los neutrinos son partículas que interaccionan débilmente, lo que significa que sus propiedades fundamentales resultan muy

difíciles de medir. Las cosmologías de materia obscura caliente alcanzaron su apogeo en los años ochenta, cuando las pruebas experimentales sugirieron que el neutrino electrónico (asociado con la desintegración nuclear beta) podía tener una masa que se escondiera en el rango crucial que predecía una abundancia cósmica sustancial.

Durante un tiempo, la materia obscura fría y la materia obscura caliente compitieron por erigirse en la teoría a adoptar sobre la formación y agrupación de galaxias. El modelo de materia obscura fría se conoció por modelo "de abajo arriba", mientras que el de materia obscura caliente fue conocido por modelo "de arriba abajo". Aquél refleja un proceso jerarquizante, donde las estructuras más pequeñas (galaxias enanas) se forman primero y se ensamblan después en estructuras cada vez mayores, conforme la atracción gravitatoria tira de ellas. En nuestro actual universo, este proceso ha alcanzado el estadio de ensamblar grandes cúmulos galácticos de unas 10^{15} masas solares, que corresponden *grosso modo* a unas mil veces la masa de la Vía Láctea.

De acuerdo con el modelo cosmológico estándar, en el cosmos predomina la energía obscura, de naturaleza desconocida y que nos remite a la entidad capaz de explicar la aceleración, según nos revelan las observaciones de la luminosidad de supernovas remotas. Reclama también la existencia de la energía obscura la necesidad de reconciliar la planitud espacial observada del universo con la densidad subcrítica de materia. El modelo más sencillo de energía obscura es la constante cosmológica, que mantiene una densidad fija en un universo que se expande. Los cosmólogos han considerado otras posibilidades. Una opción alternativa a la energía obscura consiste en postular que la ley de la gravedad pudiera ser modificada desde la hipótesis usual de la relatividad general, cuyos ejemplos más recientes guardan relación con la idea del mundo de branas.

Luis Alonso



THE COSMIC CENTURY. A HISTORY OF ASTROPHYSICS AND COSMOLOGY,

por Malcolm Longair. Cambridge University Press; Cambridge, 2006.

Historia de la ciencia

De un científico para científicos

Malcolm Longair, reputado astrónomo y catedrático de filosofía natural en la Universidad de Cambridge, ha escrito una magnífica guía cronológica y temática de la astrofísica y la cosmología contemporáneas. Nada sorprendente dadas las credenciales científicas del autor y los orígenes de la obra, basada en el capítulo sobre astrofísica y cosmología que el autor escribió para *Twentieth Century Physics* (1995), una obra de referencia en tres volúmenes coordinada por Brian Pippard, Laurie Brown y Abraham Pais.

Lo que sí resulta sorprendente es que el mismo autor reconozca en el prefacio que no ha escrito "una historia de la astronomía *per se*" y se excuse por no ser "un historiador profesional". Estamos, pues, ante un ejemplo paradigmático de "historia de científico" —todo un género dentro de la historia de la ciencia no profesional— con la salvedad de que esta "historia" tiene conciencia de sus limitaciones.

La mayor de ellas concierne a las relaciones entre ciencia y sociedad. La astrofísica de Longair tiene vida propia y apenas se muestra sensible a las transformaciones sociales, políticas y económicas que han condicionado profundamente su desarrollo, como el del resto de las ciencias, en el período contemporáneo. Que Longair ignore estas relaciones no implica que no existan, pero su historia intelectual sugiere que cuentan poco. Por ejemplo, en la pág. 23 aparece una fotografía del director del Observatorio de Harvard, E. Pickering, rodeado de hasta 13 mujeres que realizaban cálculos en dicho observatorio. La imagen es sumamente elocuente (¡estamos en 1913!) e invita a la reflexión sobre las relaciones entre género y ciencia; sin embargo, Longair no sólo obvia cualquier referencia a la ya considerable literatura sobre el tema, sino que relata sin rubor que el equipo de "calculadoras" era conocido como "el harén de Pickering"... Este ejemplo ilustra el uso limitado y selectivo que el autor hace de la bibliografía histórica.

Al tratar de la contrastación de la teoría de la relatividad general en 1919, por parte de las "famosas expediciones del eclipse" dirigidas por Arthur Eddington, Longair reconoce que los resultados de estas expediciones fueron ampliamente divulgados convirtiendo a Einstein en un personaje público, pero no menciona los trabajos recientes sobre este episodio crucial, ni el artículo, ya clásico, de John Earman y Clark Glymour ("Relativity and eclipses: The British eclipse expeditions of 1919 and their predecessors" en *Historical Studies in the Physical Sciences*, vol. 11, págs. 49-85, 1980).

Para la génesis de la relatividad general, fundamento de la cosmología contemporánea, Longair nos remite a la biografía de Abraham Pais, de 1982, cuando desde entonces han aparecido varios volúmenes de los *Collected Papers of Albert Einstein* que tratan, precisamente, de este período.

Si se acepta el planteamiento, sin embargo, el libro se revela una muy eficaz guía cronológica, técnicamente impecable, bien estructurada en cinco partes, distribuidas simétricamente en torno a 1945. Las dos primeras tratan respectivamente sobre "Estrellas y evolución estelar hasta la Segunda Guerra Mundial" y "La estructura a gran escala del universo, 1900-1939"; la parte central está dedicada a la astronomía más allá del espectro óptico visible ("Until 1945, astronomy meant optical astronomy", pág. 125), y a las innovaciones instrumentales que revolucionaron la disciplina tras el conflicto bélico; Longair retoma a continuación la discusión sobre la astrofísica de estrellas y galaxias (parte IV) y cosmología (parte V), llevándola hasta nuestros días. En definitiva, una historia de científico dirigida casi exclusivamente a otros científicos.

Xavier Roqué

¿Existe la energía obscura?

por Timothy Clifton y Pedro G. Ferreira

Quizá no. Las observaciones que llevaron a los astrónomos a deducir la existencia de la energía obscura podrían tener otra explicación: que nuestra galaxia se hallara en el centro de un gigantesco vacío cósmico.



Prevención de pandemias,

por Nathan Wolfe

Una red internacional de vigilancia de flujos víricos, de animales a humanos, facilitaría la prevención de epidemias a escala mundial.

Láseres verdes en miniatura,

por Shuji Nakamura y Michael Riordan

Los semiconductores generan luz de láser en todos los colores, salvo en uno. Nuevas técnicas de crecimiento de diodos láser permitirán contemplar el espectro íntegro.





Salvar la abeja melífera,

por Diana Cox-Foster y Dennis vanEngelsdorp

El misterioso síndrome de despoblamiento de las colmenas ha eliminado poblaciones enteras de abejas polinizadoras. Las causas son complejas, pero ya hay soluciones a la vista.

Vito Volterra,

por Ana Millán Gasca

Las transformaciones de la ciencia en el siglo XX y su nueva función en la guerra, la economía y la cultura configuraron el escenario de la actividad del matemático italiano Volterra, entusiasta defensor del valor de las matemáticas para analizar todo tipo de fenómenos físicos, biológicos y económicos.

